

Universidad de

Cádiz

Trabajos de Fin de Carrera de Ingeniería Técnica
Industrial. Especialidad Química Industrial.

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ALGECIRAS

SELECCIÓN DE UN PROCESO PARA LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE PALAS DE AEROGENERADORES

Titulación: Ingeniería Técnica Industrial, esp. Química Industrial.

Alumno: Andrés Jesús Silva Toledo.

Tutores: David Sales Lérída y Luis Alberto Fernández Güelfo.

Defensa: Octubre – 2015.

Modalidad: Trabajo de fin de carrera.

Contenido

1.	JUSTIFICACIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	3
2.1.-	Introducción.....	3
2.2.-	Perspectivas actuales para el reciclado de materiales compuestos.	6
2.3.-	Composición de las palas.	8
2.3.1.-	Generalidades.	8
2.3.2.-	Fibra de vidrio.	10
2.3.3.-	Resinas de poliéster.	12
2.3.4.-	Componentes minoritarios.	14
2.3.5.-	Palas con otros componentes.	16
2.3.5.1.-	Palas de fibra de carbono.	16
2.3.5.2.-	Palas de aluminio.	17
2.4.-	Vías de gestión de residuos.	17
2.4.1.-	Reutilización.	20
2.4.2.-	Reciclado.	20
2.4.2.1.-	Reciclado mecánico.	21
2.4.2.2.-	Reciclado químico.	23
2.4.2.3.-	Reciclado térmico.	24
2.4.3.-	Valoración energética.	24
2.4.4.-	Deposición en vertederos.	26
2.5.-	Tipos de productos finales obtenidos mediante su gestión.	26
2.6.-	Estimación cuantitativa de la problemática de gestión en España.	27
3.	OBJETIVOS.	31
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
4.1.-	Condiciones de la simulación.....	34
4.2.-	Metodología de la simulación.	35

5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
5.1.-	Cálculos para la valorización de palas de fibra de vidrio.	37
5.1.1.-	Reutilización.	37
5.1.2.-	Reciclado bajo.	48
5.1.3.-	Incineración.	52
5.1.4.-	Vertederos.....	57
5.1.5.-	Re-fabricación.....	61
5.1.6.-	Resumen de resultados obtenidos para la pala de fibra de vidrio.....	66
5.2.-	Cálculos para la valorización de palas de otros componentes.	69
5.2.1.-	Cálculos para una pala de fibra de carbono: resumen de resultados obtenidos.....	69
5.2.2.-	Cálculos para una pala de aluminio: resumen de resultados obtenidos.	73
5.3.-	Descripción del proceso de estrategia de gestión elegido.....	77
5.3.1.-	Descripción del proceso de gestión elegido para valorización de palas de GFRP (fibra de vidrio).....	78
6.	CONCLUSIONES.	87
7.	ANEXOS.	88
7.1.-	Proceso de fabricación y montaje de palas Gamesa.....	88
7.2.-	Descripción de material compuesto GFRP isotrópico (Matriz Epoxídica Reforzada con Fibra de Vidrio).....	93
8.	BIBLIOGRAFÍA.	99

1. JUSTIFICACIÓN.

El siguiente Trabajo de Fin de Carrera supone el último paso hacia la obtención del título de Ingeniero Técnico Industrial en la especialidad de Química Industrial por la Escuela Politécnica de Algeciras (Universidad de Cádiz). En este TFC, el tema a desarrollar es el siguiente: “Selección de un proceso para la valorización de residuos de palas de aerogeneradores”.

La elección de este tema surge de la necesidad cada vez más evidente de conocer cómo poder gestionar eficientemente aquellos residuos procedentes de palas de aerogeneradores, cuando quedan en desuso, por presentar algún defecto irreparable o simplemente por haber finalizado su ciclo de vida útil que se sitúa por lo general en torno a los 20-25 años de promedio.

La palas de los grandes aerogeneradores que pueblan tanto los parques eólicos españoles como los del resto del mundo actualmente, se encuentran constituidas por un tipo de material compuesto polimérico de fibra de vidrio, reforzada con resinas (que suelen ser tanto de resina de poliéster como de resina epoxi) y que por sus especiales características hacen tan compleja su valorización, que aunque se sigue investigando, aún no se ha dado con la solución esperada.

Al tratarse de un tipo de residuo emergente, al que nunca antes se había hecho frente puesto que los primeros parques eólicos en España datan de mediados de los años 80, todavía no existe una directiva europea específica que las catalogue como residuos peligrosos o tóxicos o inertes, por lo que hay un vacío legal en torno a su gestión.

Aunque constituyen la amplia mayoría, no todas las palas están constituidas de material compuesto de resina polimérica reforzada con fibra de vidrio. En los parques eólicos se pueden encontrar palas fabricadas con otros componentes como pueden ser materiales de resina polimérica reforzada con fibra de carbono que son mucho más costosas que se emplean en los aerogeneradores más sofisticados, que es un tipo de componente que en principio presenta similar problema de gestión de su residuo. Y por otra lado, también existen palas compuestas de aluminio, las cuales presentan peores propiedades que las de la fibra de vidrio, pero sí que su valorización a priori es más viable. El TFC, aunque centrándose en la valorización de palas de fibra de vidrio, abordará en menor medida tanto la valorización de la pala de fibra de carbono como la de aluminio.

Actualmente la mayoría de palas de aerogeneradores obsoletas (se calcula que unas 3000 en España) se están almacenando en vertederos incontrolados, con el consiguiente riesgo a una combustión que libere sustancias tóxicas de las que están hechas y generen un impacto en la salud y el medio ambiente.

Por tanto, debido al desconocimiento en la gestión de este tipo de residuos, este trabajo lo que propone es mostrar un estudio tanto desde un punto de vista económico, de impacto ambiental, como de capacidad de reaprovechamiento entre distintas estrategias de gestión para determinar analíticamente la mejor, y posteriormente describirlo.

2. ANTECEDENTES.

2.1.- Introducción.

A modo de introducción, en primer lugar, se hará una breve descripción del concepto de energía eólica, hasta llegar al tema de estudio en cuestión: la selección de un proceso para la valorización eficiente de residuos de palas de aerogeneradores.

La energía eólica es una fuente de energía renovable que genera electricidad a través de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire. Es una fuente de energía limpia e inagotable, que reduce la emisión de gases de efecto invernadero y preserva el medioambiente.

Ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. Es desde principios del siglo XX, cuando empieza a producir energía a través de los primeros aerogeneradores, pero no es hasta finales del siglo pasado cuando se instalaron los parques eólicos tal como conocemos hoy día (ver ilustración 1).



Ilustración 1: Parque eólico. Fuente: www.ramcc.net.

Según el número de palas que posea, se pueden distinguir distintos tipos de aerogeneradores:

Tripala: es el más empleado en la actualidad, consta de tres palas colocadas formando 120° entre sí. Un mayor número de palas aumenta el peso y coste del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor número de palas para fines generadores de energía de forma comercial, aunque sí para fines mecánicos como bombeo de agua, etc.

Bipala: ahorra el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos. Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante y amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre.

Monopala: tienen, en mayor medida, los mismos inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo.

Multipala: no es muy común en Europa. Presenta multitud de palas y normalmente es utilizado para la extracción de agua en pozos.

La industria eólica también produce aerogeneradores de distinta potencia en función de la demanda de potencia requerida. Se extiende desde los de pocos vatios, destinados por ejemplo a cargar una batería, a los 5 MW o potencia superior para los parques eólicos. Se hace necesario como consecuencia clasificarlos, y para ello se han establecido cinco familias en razón a su potencia eléctrica. La longitud del aerogenerador y de sus palas es directamente proporcional a la potencia de la estructura:

- Micro: hasta 250 W.
- Mini: 250- 1 kW.
- Pequeño: 1 kW- 50 kW.
- Media potencia: 50 kW- 750 kW.
- Gran potencia: >750 kW.

La energía eólica en España constituye una fuente de energía autóctona que actualmente genera el 18% de la electricidad en nuestro país. Se calcula que da empleo actualmente a más de 27000 personas en España. Es el cuarto país del mundo en patentes eólicas: el sector invierte alrededor de 120 millones de euros al año en I+D. Aporta cada vez más al PIB (2623 millones de euros) y a las exportaciones (1893 millones de euros) y cuenta

con empresas pioneras y líderes mundiales en el sector eólico como Gamesa o Iberdrola.

Además, es la cuarta potencia en el mundo y la segunda en Europa en producción de energía eólica por detrás de Estados Unidos y Alemania. Actualmente tiene repartidos 1077 parques eólicos entre 15 comunidades autónomas, en las que Castilla-La Mancha, Castilla y León y Galicia aportan más del 50% de la producción.

Es pues beneficioso que el sector eólico siga creciendo aún más en los próximos años a pesar de sus inconvenientes entre los que se encuentra principalmente la problemática emergente acerca de cómo poder gestionar de forma lo más eficiente posible tanto desde un punto de vista de capacidad de aprovechamiento y medioambiental, con el menor coste posible, el volumen de residuos de material compuesto proveniente de palas de aerogeneradores que ya es una realidad y que irá en aumento en los próximos años.

2.2.- Perspectivas actuales para el reciclado de materiales compuestos.

Desde que surgió en el sector eólico la problemática acerca de cómo gestionar aquellos componentes de aerogeneradores diseñados de materiales compuestos de fibra de vidrio reforzados con plásticos termoestable que quedaban en desuso o que empezaban a llegar al fin de su vida útil (para los que aún no existen unas directrices claras de gestión debido a la dificultad que presentan este tipo de materiales para su valorización), hay en marcha diversos proyectos de investigación en la búsqueda del proceso de reciclado más óptimo posible para este tipo de materiales.

En los últimos meses se han publicado patentes de procesos químicos que afirman ser capaces de separar la fibra de vidrio de la resina (plástico) a temperatura ambiente sin perder sus propiedades. Al conseguir separarla de la resina, la fibra de vidrio podría volver a ser reutilizada.

Otros proyectos de investigación han propuesto métodos térmicos para su reciclado, pero al parecer son menos eficientes que los químicos, tanto a nivel de emisiones contaminantes como en la calidad del producto final de reciclado obtenido.

El proceso de reciclado debe emitir la menor contaminación posible, que durante el proceso de reciclado no dañe en exceso las propiedades del material y que sea económicamente rentable.

Puesto que la fibra de vidrio seguirá siendo el componente principal en las aspas de los aerogeneradores, es sumamente importante dar con unas directrices eficientes de gestión.

En el siguiente punto se profundizará en cuál es la constitución de las palas para determinar donde radica la especial dificultad para su valorización.

2.3.- Composición de las palas.

2.3.1.- Generalidades.

Las palas de los grandes aerogeneradores (en el anexo 7.1 se describe el proceso de fabricación y montaje de palas Gamesa) están constituidas con una estructura central resistente más dos cubiertas exteriores que forman el perfil aerodinámico, de forma alabeada y anchura decreciente hacia la punta en dirección axial. Generalmente se encuentran fabricadas de materiales compuestos. Un material compuesto, como se puede apreciar (ver ilustración 2), es aquel que se obtiene por la unión de dos materiales para obtener un nuevo material con mejores propiedades que la de sus dos elementos por separado.

En un material compuesto se pueden diferenciar dos 2 fases: una fase continua, la matriz, que es el elemento intersticial que actúa como soporte para moldear la fibras o para proteger al refuerzo frente a agentes externos (luz, humedad, agentes químicos,...) y, por otra parte, la fase dispersa, que es un refuerzo. Las funciones del refuerzo son básicamente las de aportar propiedades mecánicas resistentes. También pueden formar parte del material compuestos otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan al material de mejores características.

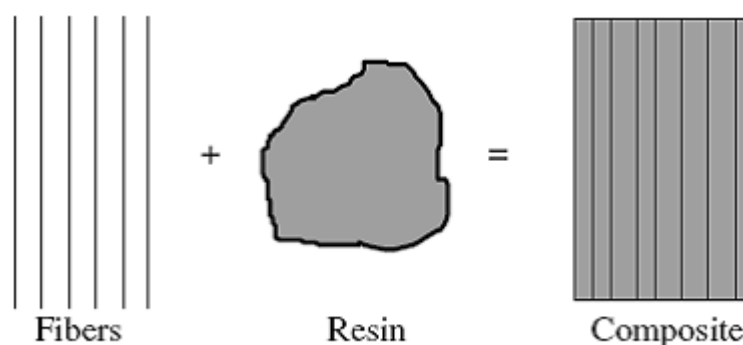


Ilustración 2: Esquema de la formación de un material compuesto. Fuente: (7).

En las palas de aerogeneradores, la matriz es de tipo polimérico. El polímero es de tipo termoestable. Eso quiere decir que son cadenas de polímeros altamente cruzados. Normalmente, éste será una resina de poliéster o de epoxi. Tienen la ventaja de poder adaptarse a cualquier proceso de transformación, presentan excelentes propiedades adhesivas y se procesan a temperatura ambiente. Una de las funciones de la matriz a resaltar es la transmisión de esfuerzos desde la matriz hasta la fibra de refuerzo y ello requiere una total interacción o adhesión entre el refuerzo y la matriz.

El tipo de refuerzos en las aspas suele ser principalmente una fibra inorgánica como la fibra de vidrio de tipo eléctrico, que es básicamente un vidrio de boro silicato de calcio y aluminio con un contenido muy bajo o nulo de potasio y sodio. Posee una buena resistencia a la humedad. Existen otros tipos de fibra de vidrio que deben sus nombres a sus principales características: tipo A (alcalino), B (boro), C (químico), D (dieléctrico), R (resistencia) o S (fuerza), pero es la de tipo eléctrico la más utilizada por sus buenas características a coste más bajo (tabla 1).

Propiedad	Fibra tipo E
Gravedad específica	2,56
Resistencia a tracción de la fibra (GN/m ²)	3,6
Punto ablandamiento (°C)	850
Conductividad térmica (W/m °C)	1,04
Índice de Refracción	1,545
Módulo de Young de elasticidad (GN/m ²)	75,9

Tabla 1: Propiedades de la fibra de tipo eléctrico. Fuente: (3).

La función del refuerzo de fibra de vidrio es el de aportar resistencia y rigidez al material, debido a su comportamiento marcadamente direccional.

Las estructuras compuestas de fibra de vidrio y resina son tan empleadas al ser tan baratas, ligeras y resistentes frente a la corrosión y el desgaste.

2.3.2.- Fibra de vidrio.

Las fibras de vidrio, en la ilustración 3 se aprecia como son los halos de fibra de vidrio, son uno de los componentes de las palas de aerogeneradores. Se usan para reforzar matrices plásticas y formar así materiales compuestos estructurales y productos de moldeo. Los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio tienen como principales características: facilidad de fabricación, elevada resistencia mecánica, alta rigidez, puntos de fusión elevados, estabilidad térmica y resistencia al calor superiores a las fibras tradicionales, no son inflamables y presentan un excelente comportamiento tanto en ambientes corrosivos como a elevadas temperaturas y coste relativamente bajo, en comparación con las fibras de carbono.



Ilustración 3: Halos de fibra de vidrio. Fuente: www.nauticexpo.es

En cuanto a la disposición de las fibras de vidrio en la matriz plástica, hay diversas formas dependiendo de las características requeridas del producto resultante. Las fibras de vidrio en principio presentan un carácter marcadamente direccional. Ello significa que presentan muy buenas propiedades globales en una sola dirección. En la fabricación de palas de fibra de vidrio se requiere que la disposición de las fibras en la matriz plástica presenten un carácter cuasi-isotrópico, o sea, varias capas de fibra de vidrio superpuestas en distintas direcciones, en función de los esfuerzos a los que tenga que estar sometido el material, para conseguir un buen comportamiento en varias direcciones. En ocasiones se utilizan más mallas de fibra como refuerzo puntual en las zonas más solicitadas. También pueden proyectarse las fibras de vidrio con pistola, quedando los hilos dispuestos aleatoriamente dentro del material.

A nivel medioambiental, la fibra de vidrio es inerte y por lo tanto su residuo es no peligroso, pero a nivel de seguridad y de salud, en procesos de corte donde se desprenden partículas sus fibras son muy peligrosas para las vías respiratorias. El valor límite (VLA-ED) a la fibra de vidrio es de 1 fibra/cm³, por lo que en estas situaciones se suele trabajar en cabinas de lijado con aspiración de polvo y como equipos de protección personal tanto el uso de máscaras y protección respiratoria.

Y en cuanto a las propiedades de la fibra de vidrio en comparación con las fibras de carbono (que son otro tipo de material de refuerzo), es sabido que tiene menor tensión y módulo que las fibras de carbono, aunque tienen mayor elongación. La densidad de las fibras de vidrio es también mayor que la de carbono. De todas formas, debido a su reducido precio y su versatilidad son las fibras de vidrio, con mucho, las más utilizadas como fibras de refuerzo para plásticos.

2.3.3.- Resinas de poliéster.

El otro componente mayoritario en las palas (aparte de otros componentes constituyentes en menor proporción) son los polímeros termoestables. En la ilustración 4 se puede apreciar la estructura de una resina de poliéster.

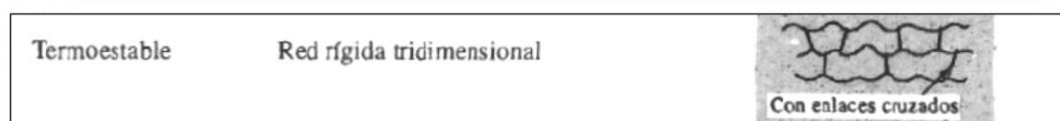


Ilustración 4: Comportamiento, estructura general y diagrama de una resina de poliéster. Fuente: (3).

Los termoestables son cadenas de polímeros altamente cruzados, que forman una estructura de red tridimensional. Ya que las cadenas no pueden girar ni deslizarse, estos polímeros generalmente son más resistentes, aunque más frágiles, que los termoplásticos. Tienen el hándicap de no tener una temperatura de fusión fija y eso hace que sea difícil reprocesarlos una vez suceda la formación de enlaces cruzados. Esa característica es la especial dificultad que se encuentra para poder hacer un reciclado de un material compuesto de fibra de vidrio reforzado con una resina de este tipo.

Los polímeros termoestables a menudo se inician como cadenas lineales. Dependiendo del tipo de unidades de repetición y del grado de polimerización, el polímero inicial puede ser un sólido o una resina líquida; en algunos casos, ésta se utiliza en dos o tres partes. El calor, la presión la mezcla de varias de las resinas u otros métodos, inician la formación de enlaces cruzados.

Entre los polímeros termoestables más comunes en las palas de los aerogeneradores se encuentran tanto las resinas de poliéster como las de epoxi.

La resina epoxi se utiliza generalmente para endurecer otros productos. Pinturas y barnices pueden incluir esta resina para ganar consistencia. En la electrónica, la resina epoxi permite proteger circuitos y transformadores para evitar daños por el polvo o la humedad.

Y las resinas de poliéster son de menor coste pero no son habitualmente tan fuertes como las resinas epoxi. Los poliéster insaturados son utilizados ampliamente como matrices de plásticos reforzados con fibras y son las resinas artificiales más comunes usadas como refuerzo en las palas de aerogeneradores.

Los poliésteres forman cadenas de moléculas de ácido y alcohol mediante una reacción de condensación, dando como subproducto agua. Cuando estas cadenas contienen enlaces no saturados, una molécula de estireno puede proporcionar el enlace cruzado. Las resinas de poliéster se utilizan como material para moldes o para vaciado en una diversidad de aplicaciones eléctricas, laminados decorativos y como matriz de materiales compuestos, como es el caso de la fibra de vidrio.

En la tabla 2 se puede apreciar las propiedades de la resina de epoxi frente a las de poliéster. Se aprecia que las ambas tienen propiedades muy similares, presentando las resinas epoxi mejor resistencia a la tensión y mayor elongación, pero peor módulo de elasticidad y densidad que las resinas de poliéster.

	Resina epoxi	Resina de poliéster
Resistencia a la tensión (psi)	15.000	13.000
Elongación (%)	6	3
Módulo de elasticidad (psi)	500	650
Densidad (g/cm ³)	1,25	1,28

Tabla 2: Propiedades de la resina epoxi frente a la resina de poliéster. Fuente: (3).

2.3.4.- Componentes minoritarios.

En la pala además del material compuesto de fibra de vidrio y resinas de poliéster que representa en torno al 70% del peso de los componentes de la pala, también se presentan otros componentes (ver ilustración 5) como cloruro de vinilo (PVC), los “gel coats”, los poliuretanos o pinturas especiales que complementan las características del aspa ya que potencian tanto la cohesión como la protección del aspa ante agentes externos.

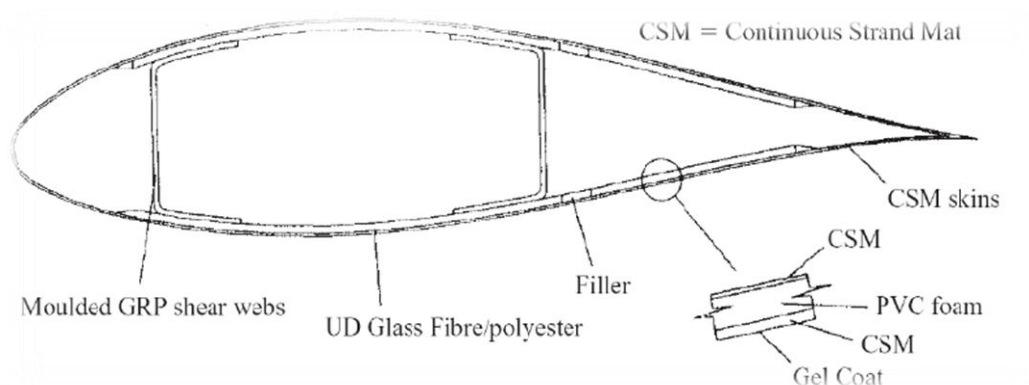


Ilustración 5: Componentes de una pala. Fuente: (33).

Elementos estructurales de la pala:

Núcleo: consta de una estructura tipo sándwich. Se utilizan para proporcionar estabilidad a la estructura. Su función es aumentar el espesor del laminado, aumentando el momento de inercia con el menor aumento de peso posible. Propiedades del núcleo:

- Bajo peso.
- Resistencia a cortadura y compresión.
- Buena adhesión.
- Aceptabilidad al molde y facilidad de impregnación.
- Reciclabilidad.

Adhesivos: se utilizan para unir paneles de material compuesto entre sí. Los adhesivos que se utilizan son de resinas similares a las utilizadas en los materiales compuestos que une. Suelen ser de base de epoxi, poliéster o poliuretano.

Propiedades del adhesivo:

- Resistencia a la cortadura.
- Contaminación de las superficies a unir (tratamiento: lijado, etc.).
- Espesor de la línea de adhesivo.
- Fluidez y viscosidad del adhesivo.
- Facilidad para la puesta en obra.
- Necesidad de curado a altas temperaturas.
- Entorno químico (agentes atmosféricos, agua marina,...).

Recubrimientos: la mayoría de las piezas realizadas en material compuesto llevan un recubrimiento cuyos objetivos son la protección de la superficie contra productos químicos, intemperie o humedad y la consecución de un buen acabado de la pieza que permita cumplir los criterios aerodinámicos.

Estos recubrimientos pueden aplicarse como primera capa sobre el molde (gel coat= resinas con color) o bien como pintura que se aplica posteriormente.

Suelen ser de poliéster o uretano, con una serie de aditivos (cargas estabilizadoras UV) para proporcionarles resistencia a la intemperie y abrasión.

2.3.5.- Palas con otros componentes.

La mayoría de las palas que pueblan el parque eólico nacional están compuestas por materiales de fibra de vidrio (GFRP: polímero reforzado de fibra de vidrio), pero no se puede obviar de también hay palas constituidas con otros tipos de materiales, aunque sean menos habituales que la fibra de vidrio entre las que se podrían destacar las palas de fibra de carbono (CFRP: polímero reforzado con fibra de carbono), en su caso por el elevado coste de las fibras de carbono, o las de aluminio.

2.3.5.1.- *Palas de fibra de carbono.*

La fibra de carbono es un material compuesto no metálico de tipo polimérico. Está compuesto por una matriz que contiene un refuerzo a base de fibras, en este caso de carbono.

Es un material muy caro, ligero y de propiedades mecánicas elevadas. Es muy reducido el número de palas con este compuesto debido al elevado precio en relación con el rendimiento de más que podría ofrecer respecto de una pala de fibra de vidrio. Eso sí, en las palas de fibra de vidrio se le suele incluir cantidades de fibra de carbono en pequeñas proporciones para tratar de mejorar la calidad.

2.3.5.2.- *Palas de aluminio.*

El aluminio es un metal ligero, blando pero resistente, de color blanco brillante. Su densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre. Es muy maleable, dúctil y es apto para el mecanizado y la fundición. Debido a su elevado calor de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al_2O_3) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación proporcionándole resistencia a la corrosión y durabilidad.

Su ligereza, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión le convierten a priori en un material idóneo para la fabricación de aspas de aerogeneradores.

2.4.- Vías de gestión de residuos.

Podemos entender la gestión de residuos como la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluida las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.

El almacenamiento de residuos de palas de aerogeneradores aún no es una solución sostenible y su destrucción no resulta satisfactoria debido a los desechos que se producen como derivados y a los residuos muy concentrados y contaminantes. No hay directrices claras acerca de cómo gestionarlo de una forma responsable, segura y económica.

Actualmente, el destino en más de un 90% de los casos es la deposición en vertederos, no obstante, aproximadamente un 10% son tratados por empresas gestoras de residuos que los recogen y los trituran, consiguiendo así reducir tanto el impacto ambiental como tratando de valorizar lo posible.

La Unión Europea como se puede apreciar en la ilustración 6, señala de manera clara cuál es el orden en el que se deben gestionar los mismos, lo que se conoce con el nombre de “jerarquía de gestión de residuos”:



Ilustración 6: Pirámide de gestión de residuos. Fuente: elajosostenible.wordpress.com

Prevención: medidas adoptadas antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en residuo. Es decir, tratar de realizar un buen mantenimiento durante la vida útil del aerogenerador, para intentar sacarle el mayor rendimiento posible.

Reducción o minimización: se trataría de hacer un estudio del número de aerogeneradores instalados para comprobar que son los justos y necesarios para obtener la energía que se pretende. Si hubiera un mayor número de aerogeneradores de los

necesarios, lo recomendable sería de intentar atajar el problema no instalando más aerogeneradores de los necesarios de forma descontrolada e indiscriminada porque una vez lleguen al final de su vida útil, llegará el problema de encontrarse con toneladas de residuos extra.

Tanto la prevención como la reducción serían medidas llevadas a cabo para tratar de llegar a un menor volumen de residuos final a gestionar.

A continuación, se situarían aquellas vías de gestión existentes una vez obtenido el residuo, entre las que se encuentran:

Reutilización: método con el cual es posible volver a utilizar a utilizar el residuo en un nuevo ciclo de vida útil, bien con la función que desempeñaba anteriormente o con otros fines.

Reciclado: someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar el producto resultante con alguna otra finalidad útil.

Valoración energética: mejor conocida como combustión controlada o incineración. Con la tecnología adecuada, estos sistemas son muy respetuosos medioambientalmente: evita la formación de nuevos vertederos y se minimiza la producción de emisiones.

Deposición en vertederos: Es la opción más económica pero siempre la última vía a tomar. Es la que menos capacidad de reaprovechamiento de residuo tiene, ya que es nula y el impacto ambiental es el peor posible. Se puede diferenciar entre vertederos controlados e incontrolados.

Descripción de las diferentes vías de gestión de forma más profunda:

2.4.1.- Reutilización.

Como se definió anteriormente, la reutilización consistiría en una vía de gestión que lograría volver a dar utilidad al residuo para la misma función que desempeñaba antes de finalizar su vida útil o para una nueva utilidad, bien mediante su reparación para un mismo uso, o bien utilizando la imaginación para un uso diferente. En teoría, después de la prevención y la reducción, es el método de gestión ideal por capacidad de reaprovechamiento y favorable para el medio ambiente, no así a nivel económico que conlleva un coste elevado según tipo de material, volumen a gestionar y a lo laborioso del proceso.

La reutilización es un tipo de gestión bastante común en residuos tales como: botellas de vidrio, latas, ropa... pero no es habitual en productos de fibra de vidrio, ya que se trata de un material con una estructura y unas características especiales de mayor complejidad debido a sus particularidades que se detalló anteriormente.

2.4.2.- Reciclado.

El reciclado consiste en darle al residuo un tratamiento para obtener alguna otra finalidad útil a partir de él. En teoría, los residuos materiales compuestos no se pueden reciclar, pero si es posible realizarles lo que se conoce técnicamente como un reciclado bajo (en inglés: “downcycle”). El reciclado bajo es el proceso de convertir materiales de desecho o productos inútiles en nuevos materiales o productos de menor calidad y funcionalidad reducida.

El objetivo de este es evitar el desgaste de materiales potencialmente útiles, reducir el consumo de nuevas materias primas, reducir el uso de la energía, reducir la contaminación atmosférica y contaminación del agua y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (aunque la reutilización de los productos químicos tóxicos contaminados para otros fines puede tener el efecto contrario), en comparación con la producción de materiales vírgenes.

La mayoría del reciclado es en realidad “downcycling”, que reduce la calidad de un material con el tiempo. Se pueden distinguir 3 tipos de reciclado: el reciclado mecánico, el reciclado químico y el reciclado térmico.

2.4.2.1.- Reciclado mecánico.

El reciclado mecánico se considerará exclusivamente para aquellos productos procedentes del consumo, es decir, para aquellos que ya hayan tenido una primera utilización y no el de aquellos que son el resultado de una producción fallida o de restos de fabricación, que se reciclan inmediatamente en la propia industria transformadora o se venden en otras empresas.

El procedimiento que se sigue para reciclar mecánicamente plásticos consiste en trocear el material e introducirlo en una extrusora para fabricar granza reciclada y después transformarla por los medios ya descritos anteriormente o bien hacer la transformación directa del producto troceado. En la ilustración 7 se representa gráficamente las etapas en el reciclado mecánico:



Ilustración 7: Esquema del proceso de reciclado mecánico. Fuente: (15).

Los polímeros entrecruzados (como es el caso de los materiales que constituyen las aspas), al no poder fluir debido a sus propiedades, es imposible darles nuevas formas y usos de alta valorización, pero sí que pueden ser nuevamente utilizados si se les tritura, aplicándolos como materiales de relleno para carreteras, pistas deportivas o para preparar tierras de cultivo.

En segundo lugar, el residuo de fibra de vidrio aunque disponga de una fracción que se pueda reciclar, al haber tenido anteriormente una vida útil, es obvio que habrá perdido en cierto grado sus propiedades, bien debido a la degradación que haya sufrido durante su uso o bien por la presencia de sustancias ajenas de los productos que contuvo. Esta merma de propiedades hace que la porción de fibra de vidrio que se pueda valorizar deba emplearse en la fabricación de productos diferentes a los del primer uso o en aplicaciones con menores exigencias como ya precisé en el párrafo anterior.

El interés del reciclado mecánico de los plásticos tiene fuertes consideraciones económicas. El precio de la granza virgen es muy superior al de del material pos consumo limpio y seco puesto en la fábrica transformadora, por ello desde un punto de vista económico, el reciclado mecánico supone una ventaja.

Entre las desventajas del reciclado mecánico se encuentran: los costes de transporte del origen del residuo a la planta transformadora, los elevados costes de la energía necesaria para realizar el reciclado, la falta de uniformidad de criterios legislativos entre las distintas autonomías,...

2.4.2.2.- *Reciclado químico.*

El reciclado químico es un proceso que puede ser definido ampliamente como la reacción reversible de la polimerización hacia la recuperación de materias primas, gracias al empleo de diferentes tipos de reacciones químicas. En la ilustración 8 se puede ver un esquema del proceso:

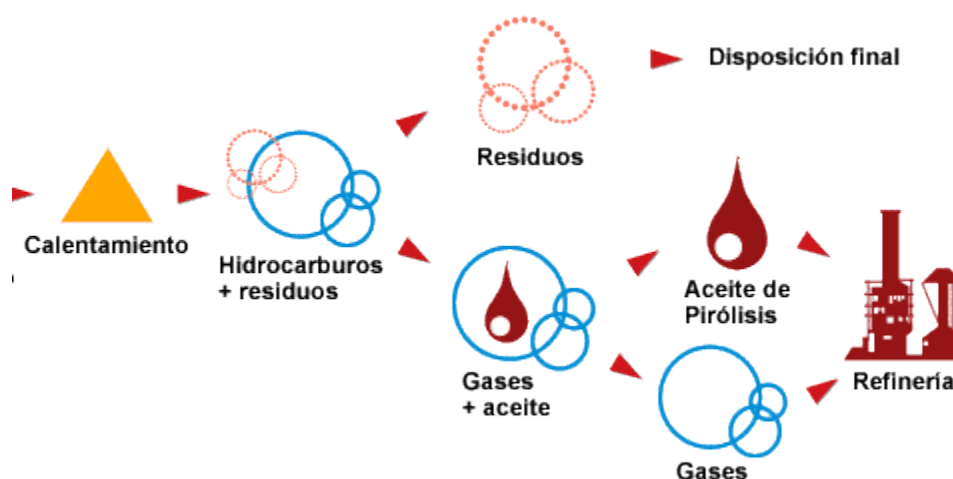


Ilustración 8: Esquema del proceso de reciclado químico. Fuente: (15).

Supone una alternativa de gestión diferente al reciclado mecánico, en el caso de aquellos residuos que no están en condiciones de ser sometidos a un reciclado mecánico porque estén muy degradados, con lo que no darían productos finales con buenas características o por cualquier otro motivo, y en ese aspecto el reciclado químico es más eficiente.

2.4.2.3.- Reciclado térmico.

El reciclado o degradación térmica es un proceso que permite la recuperación de la fibra de vidrio en cierta medida, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. El reciclado térmico podría ser considerado como un reciclado químico en condiciones de altas temperaturas. En la ilustración 9 se puede apreciar un esquema del proceso.

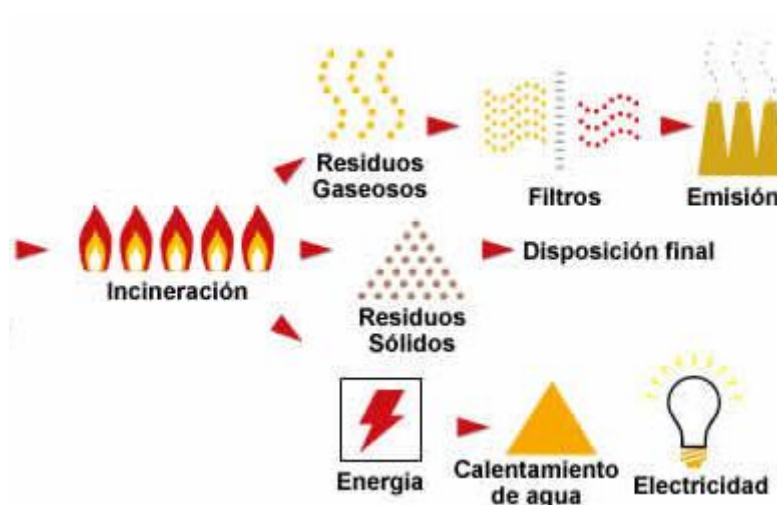


Ilustración 9: Esquema del proceso de reciclado térmico. Fuente (15).

2.4.3.- Valoración energética.

La incineración es una técnica de valorización energética en la que, mediante una combustión controlada, se transforma la fracción orgánica de los residuos en materiales inertes y gases (cenizas, CO_2 y agua) desprendiéndose simultáneamente una gran cantidad de calor que se puede aprovechar.

Los principales objetivos de la misma son:

- Reducción del peso y del volumen con respecto al residuo original.
- Recuperación de energía.

BENEFICIOS DE LA INCINERACIÓN:

1. Reducción del volumen (hasta el 90% del volumen original).
2. Esterilización de los residuos, lo que es importante sobre todo en materiales infecciosos.
3. Recuperación de la energía de los residuos, proporcionando un ahorro de combustibles fósiles.
4. Reducción de las emisiones de metano que se desprenden en los vertederos.
5. Fijación de los metales pesados en las escorias como sales estables. Las cenizas, que podrían contenerlos, se depositan en rellenos especiales para ellas, o se vitrifican vía tecnología plasma.

INCONVENIENTES DE LA INCINERACIÓN:

1. Materiales como plásticos, cartones y papeles que tienen una alta capacidad calorífica, pueden ser desviados del reciclaje para ser destinados a la incineración.
2. Posible contaminación y acumulación de sustancias en la cadena trófica.
3. Generación de cenizas que son consideradas peligrosas y deben ser confinadas en un depósito de control adecuado.
4. Desincentiva el reciclado.
5. Emisión de gases que deben ser tratados, ya que son contaminantes.

2.4.4.- Deposición en vertederos.

De entre todas las formas de gestión (reutilización, reciclado, incineración o la recuperación), la deposición en vertederos es la elección menos costosa a nivel económico, pero la más desfavorable desde un punto de vista tanto ambiental como de capacidad de reaprovechamiento, que es nula. Se puede distinguir entre vertederos controlados y vertederos incontrolados:

- Los vertederos controlados consisten en la deposición ordenada de los residuos en lugares preparados para tal fin. Este tipo de vertedero debe cumplir las disposiciones legales vigentes en cuanto a regulación, control y autorizaciones.
- Los vertederos incontrolados suelen situarse en cualquier explanada retirada, barranco, agujero, margen de río,..., donde se descargan de cualquier forma los residuos. Este tipo de vertido puede ser realizado tanto por particulares como ciertas empresas que desean perder algunos objetos de vista de la forma menos costosa posible.

2.5.- Tipos de productos finales obtenidos mediante su gestión.

Entre los fines en la valorización de cualquier residuo el de encontrar una nueva salida productiva a un residuo para el que actualmente el único destino suele ser en la amplia mayoría de los casos el vertedero, consiguiendo disminuir así su impacto ambiental.

Es fundamental que los productos valorizados tengan una demanda en el mercado. La calidad de los mismos ha de ser adecuada para cumplir los requerimientos y sus precios han de ser competitivos en comparación con los productos vírgenes.

Actualmente, aquellos residuos de palas de aerogeneradores que no son llevados directamente al vertedero y a los que cuales se les trata de buscar una nueva utilidad, los fines más habituales son:

- Adición en pequeñas proporciones para materiales de relleno en materiales de construcción y del transporte.
- La incineración para obtener energía de su combustión al combinarse con la carga típica de alimentación de hornos.
- Material de carga para la fabricación de nuevos materiales de GFRP.
- Relleno sanitario.
- Fabricación de pallets de altas prestaciones.
- En parques de ocio como infraestructuras.

2.6.- Estimación cuantitativa de la problemática de gestión en España.

Los primeros aerogeneradores instalados en España similares a los que hoy en día conocemos datan de 1985, aunque no es hasta el año 1997 cuando el sector eólico empieza a crecer de forma significativa.

Actualmente, España cuenta con en torno 25.000 aerogeneradores repartidos en 1077 parques eólicos, cuando a finales del siglo pasado, contaba con unos 8.000 distribuidos en 400 parques (ver ilustración 10).

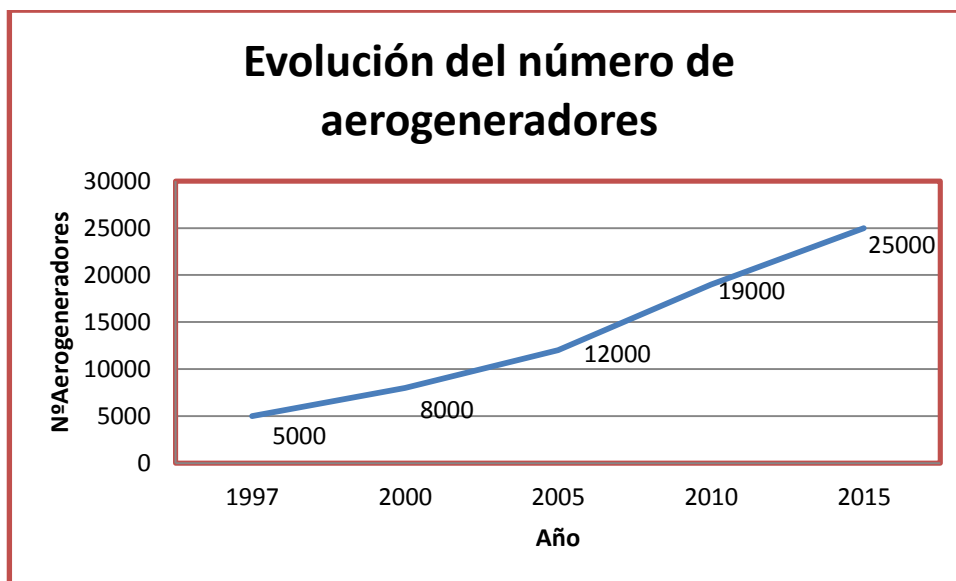


Ilustración 10: Estimación del número de aerogeneradores en España a lo largo de los últimos años.
Fuente: Datos extraídos de ReciclaIia (2014).

En estos momentos, las palas de aproximadamente la mitad del parque eólico nacional existente, se encuentran a punto de alcanzar su final de vida útil y con el transcurso de los años si no se toman medidas más efectivas de gestión y si el material empleado continúa siendo principalmente la GFRP, se irá incrementando este volumen de residuo debido a que las de aquellos aerogeneradores instalados con posterioridad también irán “envejeciendo”, llegando así al final de su vida útil. Se trata de un problemática creciente el encontrar soluciones de gestión más eficientes a las de la actualidad, ya que dentro de una década habrán llegado al final de su vida útil todas aquellas palas puestas en funcionamiento hasta 2.005, lo cual constituye casi la mitad del entramado eólico actual.

Yendo más allá, en el año 2.035, se calcula que las palas de todos los aerogeneradores instalados hasta la fecha ya habrán sido retiradas por otras nuevas, en las cuales seguirá teniendo futuro el empleo del material de fibra de vidrio, a pesar de que se empiece a probar la viabilidad de nuevos componentes como son los nanotubos de carbono. Teniendo en cuenta de que actualmente se trata de unas 75.000 palas, el volumen de residuo de GFRP a tratar rondará las 450.000 toneladas. Y ahí no queda todo, ya que el parque eólico nacional seguirá aumentando año tras año con la implantación de nuevos aerogeneradores, con lo que la cifra de toneladas de residuo anual ha ido y seguirá creciendo de forma exponencial en los próximos años, como se puede apreciar en la

ilustración 11. Entre 2.015-2.020 se prevé la instalación de 5.000 nuevos aerogeneradores, o lo que es lo mismo 15.000 nuevas palas que valorizar en un futuro, con lo que el parque eólico español pasaría a disponer de 30.000 aerogeneradores.

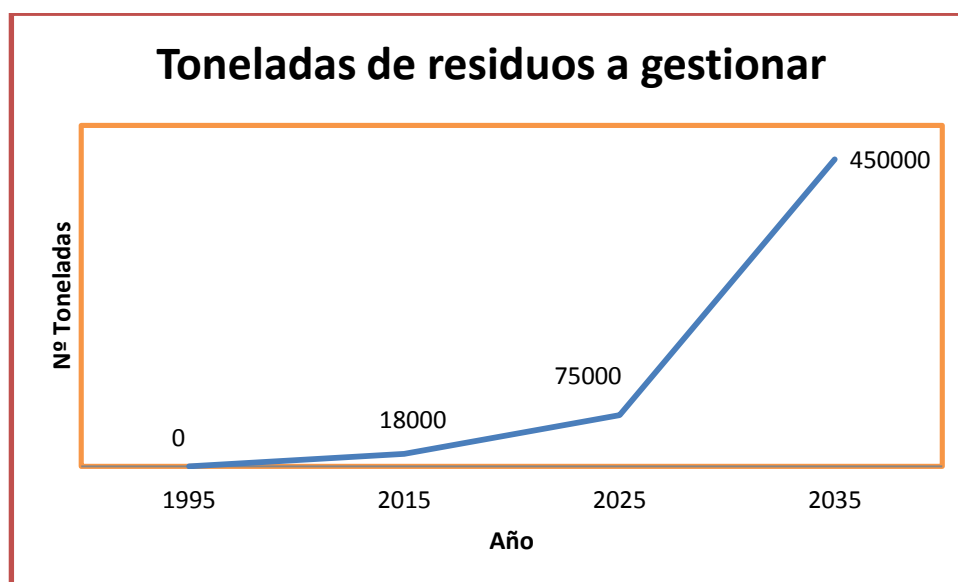


Ilustración 11: Estimación de toneladas de residuo de GFRP a gestionar. Fuente: Datos extraídos de Recicla1ia (2014).

Se calcula que hasta la fecha (1.997- 2.015) se han sustituido alrededor de 3.000 palas por daños irreparables, lo cual han constituido hasta el momento unas 18.000 toneladas de residuos de material compuesto. El destino de las palas retiradas ha sido en un 90% de los casos, y en casos aislados su incineración para recuperar algo de energía pero mayoritariamente la deposición en vertederos, enterramientos a pie de molino, almacenamiento en depósitos localizados en las inmediaciones de los grandes parques eólicos,... las cuales son la última opción contemplada dentro de la jerarquía de gestión de residuos establecida en la Ley 22/2.011 de residuos y suelos contaminados. El depósito en vertedero es lo último de lo último, a pesar de que resulte la opción más económica, ya que el perjuicio al medio ambiente es el máximo y la valorización es nula. Siempre que haya otras opciones la ley las prioriza claramente. Solo a un 10% del residuo de GFRP, se le ha realizado algún tipo de tratamiento de valorización, que suele ser una incineración, y en contados casos innovadores procesos de reutilización y de reciclado que prueban algunas empresas gestoras de residuos. Actualmente, el volumen de residuos a gestionar aumenta cada año en unas 1.000 toneladas, esto son, unas 300 palas. Tanto el que no exista una legislación en la gestión de este tipo de residuos y

sobre todo el no haber encontrado procesos de valorización lo suficientemente eficientes hasta el momento, han provocado esta situación. En la tabla 3 se recogen los datos anteriormente citados:

Número de parques eólicos	1.080
Número de aerogeneradores	25.000
Número de palas operativas	75.000
Toneladas de residuo (1.997-2.015)	18.000
Toneladas de residuo al año actualmente	1.000
Toneladas de residuo en 2.025	75.000
Toneladas de residuo en 2.035	450.000

Tabla 3: Estimación de toneladas de residuos a gestionar teniendo en cuenta la dimensión del parque eólico. Fuente: Reciclaia.

Se hace necesaria pues, la gestión de este tipo de residuos, en primer lugar, de la forma más beneficiosa para el medio ambiente, en segundo lugar, tratando de obtener la mayor valorización posible y con el menor coste posible.

De momento, aún no se puede hablar de soluciones lo suficientemente convincentes que establezcan estrategias para la gestión, reciclado o reutilización de los componentes de las palas de los aerogeneradores.

3. OBJETIVOS.

Resulta evidente que todo material utilizable hoy en día (una vez cumplida su vida útil), sea posteriormente tratado de manera que en la medida de lo posible se reaproveche mediante reutilización o reciclaje y rinda algún beneficio. Y esto se hace fundamentalmente por un doble motivo: para evitar la contaminación del medio ambiente y para economizar al máximo los recursos naturales.

En este caso, se va a profundizar en la gestión de un residuo especialmente complejo de tratar como es el de las palas de aerogeneradores. Se trata de un residuo cada vez más común, debido al crecimiento del sector eólico en estos últimos años. La principal amenaza es el grave impacto medioambiental y de salud (dado que provoca cáncer), que podría causar debido al elevado volumen a gestionar que cada vez es mayor.

En la mayoría de las palas el constituyente principal es una matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio. Pero, no todas las palas están compuestas de fibra de vidrio. Se pueden encontrar fabricadas con otros 2 tipos de materiales: palas de aluminio (disponen de buenas propiedades, aunque inferiores a las de la fibra de vidrio) y de fibra de carbono (de mayores prestaciones tanto que la fibra de vidrio o el aluminio pero su alto coste impide que no sean las más fabricadas).

El procedimiento que se seguirá en este TFC será el de estudiar según del tipo de material del que esté fabricado el aspa (fibra de vidrio, fibra de carbono o aluminio), obtener mediante un software de ingeniería de materiales, tanto el consumo energético como la huella de carbono tanto durante en la vida como al final de su vida útil, considerando al final de ésta para cada caso, todos los tipos de valorización de residuos que permita el material, para poder así poder demostrar cuál es la más eficiente en términos cuantitativos. Una vez se determine la vía de valorización más eficaz, se describirá su proceso de gestión.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

En este punto del TFC, se procederá a realizar el estudio comparativo a modo de simulación del ciclo de vida de una pala de aerogenerador constituida de un material compuesto de fibra de vidrio con resina epoxi, que consiste en un material que se obtiene por la unión de dos materiales, en esta caso resina epoxi reforzada con fibra de vidrio para obtener un nuevo material con mejores propiedades que la de sus dos elementos por separado (en el anexo 7.2 se describe las características de este tipo de material compuesto).

Para cada tipo de ensayo, se introducirán exactamente las mismas condiciones, excepto para la etapa de final de vida útil del material, en la cual para cada caso se irá alternando entre los distintos tipos de gestión posibles, para una vez obtenidos todos los resultados, sea posible comparar y determinar la gestión de residuo más óptima, esto es, determinar la vía de gestión más eficiente tanto desde un punto de vista ambiental como de capacidad de valorización.

También se hará la simulación tanto considerando que la pala es de aluminio como si es de fibra de carbono.

Para realizar este estudio será necesaria la herramienta Eco Audit del software CES (Cambridge Engineering Selector), que consigue calcular el consumo energético y el CO₂ producido durante la vida de un producto (material, fabricación, transporte, uso y final de vida) e identifica cuál es su fase dominante.

El consumo energético mide la cantidad de energía consumida o recuperada en cada etapa. Por otra parte, la huella de carbono es un recuento de las emisiones de dióxido de carbono que son liberadas a la atmósfera.

Los resultados de mayor interés para los que se hace este estudio comparativo serán los obtenidos en la etapa en la que la etapa llega a su vida útil que podría dividirse en dos (ver ilustración 12): una primera, la fase de desecho o de eliminación (conocida en inglés como “disposal”), que incluye el coste de retirada de la pala para su eliminación en vertedero, o bien para su separación y clasificación para un hipotético reaprovechamiento. Y una segunda fase independiente después de la vida útil conocida como “Eol Potential”, que representa la capacidad de reaprovechamiento del componente a gestionar.

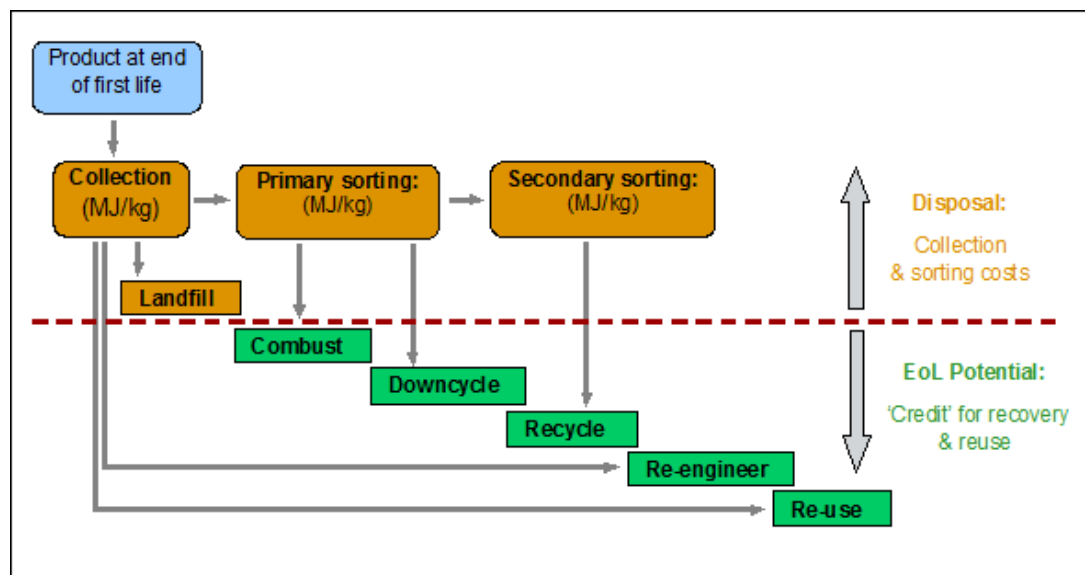


Ilustración 12: Esquema de las distintas vías de gestión. Fuente: CES Edupack (help).

4.1.- Condiciones de la simulación.

Para todos los supuestos se dispondrá de una pala retirada de un aerogenerador de alta potencia de 1 MW, que es retirada al llegar al final de vida útil.

Se considerará que la pala fue fabricada con un contenido de reciclado 0, una masa de 6 toneladas (se considerará un tamaño de pala de 50 metros, aunque las hay de diversas longitudes, desde los 30 hasta los 100 metros) y un proceso primario de moldeo por transferencia de resina.

Tanto para los cálculos de la pala de fibra de vidrio como la de fibra de carbono el software permite seleccionar entre cualquiera de las siguientes vías de gestión: reutilización, reciclado bajo (definido anteriormente como el proceso de convertir materiales de desecho o productos inútiles en nuevos materiales o productos de menor calidad y funcionalidad reducida), incineración, vertedero y re-fabricación. Mientras que para los cálculos para la pala de aluminio permite: reutilización, reciclado, reciclado bajo, vertedero y re-fabricación. Es decir, tanto para la fibra de vidrio como para la de carbono no permite el reciclado común, mientras que para la de aluminio no permite la incineración.

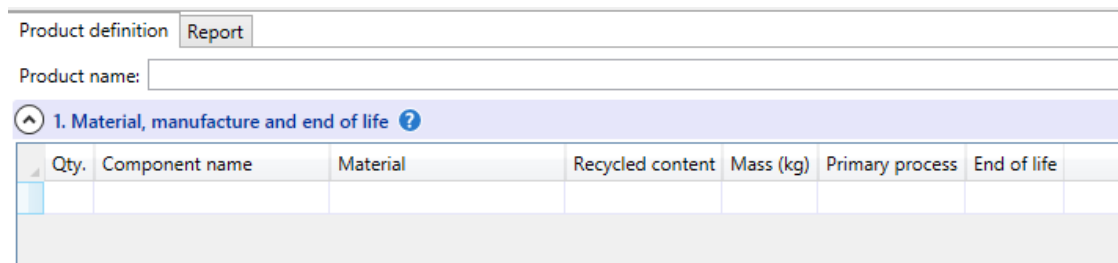
Para el transporte del componente desde el lugar de fabricación de la pala hasta el de su instalación en el aerogenerador, y que será transportada en un camión que soporte hasta 32 toneladas de carga. También se considerará una vez finalizada la vida útil de la pala, la distancia entre el punto de retirada de la pala hasta el lugar de gestión.

Y en cuanto a la vida útil, se va a considerar 22,5 años de promedio, ya que el tiempo de funcionamiento se sitúa entre 20 y 25 años aproximadamente.

4.2.- Metodología de la simulación.

La metodología del software es la siguiente:

- El primer paso es introducir el nombre del producto. A continuación: el tipo de material, la cantidad, si es una materia prima o un material reciclado, la masa, el tipo tratamiento primario y la vía de gestión una vez el producto llegue a su vida útil (ilustración 13):

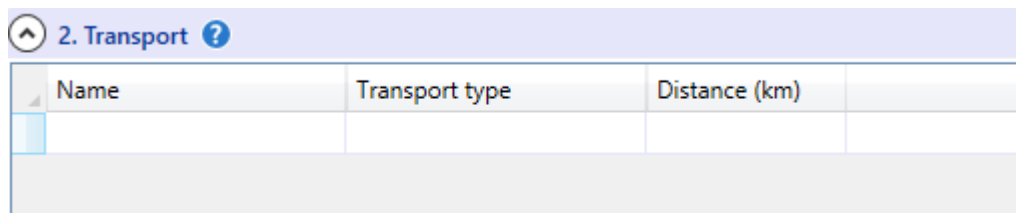


The screenshot shows a software interface with a 'Product definition' tab and a 'Report' button. Below is a 'Product name:' input field. A section titled '1. Material, manufacture and end of life' contains a table with the following columns: Qty., Component name, Material, Recycled content, Mass (kg), Primary process, and End of life. The table has one empty row for data entry.

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life

Ilustración 13: Tipo de material, modo fabricación y final de vida. Fuente: (8).

- El segundo punto corresponde al transporte. Se introduce el lugar de fabricación de la pala y el de destino, la distancia entre ambos y el tipo de transporte empleado. También se considerará al final de su vida útil la distancia desde el lugar de retirada hasta su destino de gestión (ilustración 14):

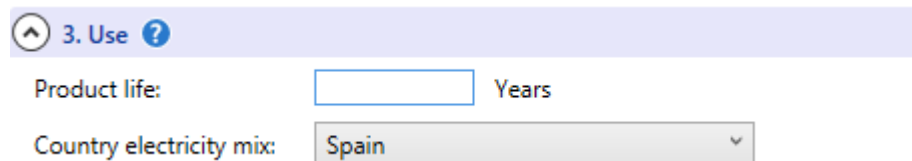


The screenshot shows a software interface with a section titled '2. Transport'. It contains a table with the following columns: Name, Transport type, and Distance (km). The table has one empty row for data entry.

Name	Transport type	Distance (km)

Ilustración 14: Casilla de transporte. Fuente: (8).

-A continuación se indicará el tiempo de vida útil estimado y ubicación del producto (ilustración 15):



The image shows a software interface with a light blue header bar containing a back arrow, the text '3. Use', and a help icon. Below the header, there are two input fields. The first is labeled 'Product life:' and consists of a text box followed by the word 'Years'. The second is labeled 'Country electricity mix:' and is a dropdown menu with 'Spain' selected and a downward arrow icon.

Ilustración 15: Casilla de tiempo de vida útil del producto. Fuente: (8).

-Posteriormente, para determinar el consumo energético y la huella en la etapa de uso del material, se procederá a realizar sus cálculos en una hoja Excel a partir de la potencia del aerogenerador.

-Por último, una vez obtenido el informe de resultados de todos los casos, se trata de identificar la fase de vida dominante de la pala que más contribuye al impacto ambiental, analizando y comparando con qué estrategia de gestión se puede minimizar el impacto de forma más significativa y se puede obtener la mayor valorización posible.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1.- Cálculos para la valorización de palas de fibra de vidrio.

5.1.1.- Reutilización.

Por reutilización se entiende la capacidad de gestionar el residuo de tal forma que sea posible volver a usarlo con la misma utilidad o con otra distinta. Para este caso el reutilizar la pala tal cual es retirada para el mismo tipo de uso resulta inviable. Se trataría de darle un uso distinto. Hay palas que al llegar al final de su vida útil se reutilizan como infraestructuras para el disfrute al aire libre (ver ilustración 16). A priori, la reutilización de las palas libraría de una gran cantidad de emisiones de CO₂ en su gestión en el final de vida útil, dándoles una segunda oportunidad de seguir en contacto con el viento.

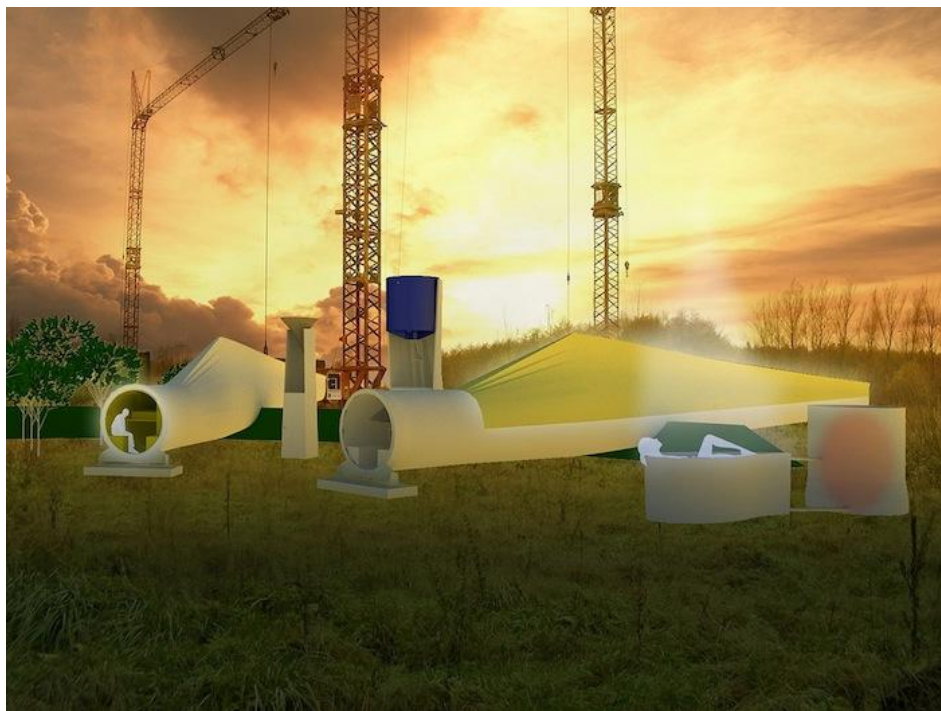


Ilustración 16: Infraestructura de ocio a partir de palas de GFRP reutilizadas. Fuente: (25).

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para la opción de reutilización, empleando la herramienta software de materiales CES EduPack. Tras insertar los datos, se genera un informe en el que se muestra una tabla resumen con el consumo energético y la huella de CO₂ para cada etapa del componente:

Etapa	Energía (TJ)	Energía (%)	CO ₂ (t)	CO ₂ (%)
Material	958	92,3	59,9	90,4
Fabricación	76,8	7,4	6,1	9,3
Transporte	1,9	0,2	0,1	0,2
Desecho	1,2	0,1	0,08	0,1
Total (durante la vida útil)	1.038	100	66,2	100
Reaprovechamiento al final de vida útil	-958		-59,9	
Total (tras la etapa del final de vida)	80		6,3	

Tabla 4: Resumen de cálculos para la reutilización como vía de gestión. Fuente: (8).

Según se aprecia en la tabla 4, la etapa del material es la fase dominante* de la vida útil de las fases consideradas las cuales: material, fabricación, transporte y desecho, constituyendo una aportación de un 92,3% de consumo energético y un 90,4% de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil. Esta aportación es tan alta debido, en primer lugar, al elevado volumen de material utilizado por pala y, en segundo lugar, a la elevada energía por unidad de masa que es necesario aportar para producir el material (lo que se conoce como *contenido en energía para la producción primaria*). En la ilustración 17, se muestra una comparativa de esta variable para los principales materiales de ingeniería.

*Sin tener en cuenta la fase de funcionamiento que es realmente la dominante, pero es calculada a parte al final de este apartado. Este cálculo al margen no tiene mayor relevancia puesto que lo importante es tanto el consumo energético como la huella de la etapa desecho obtenidos según la estrategia de gestión de residuos considerada.

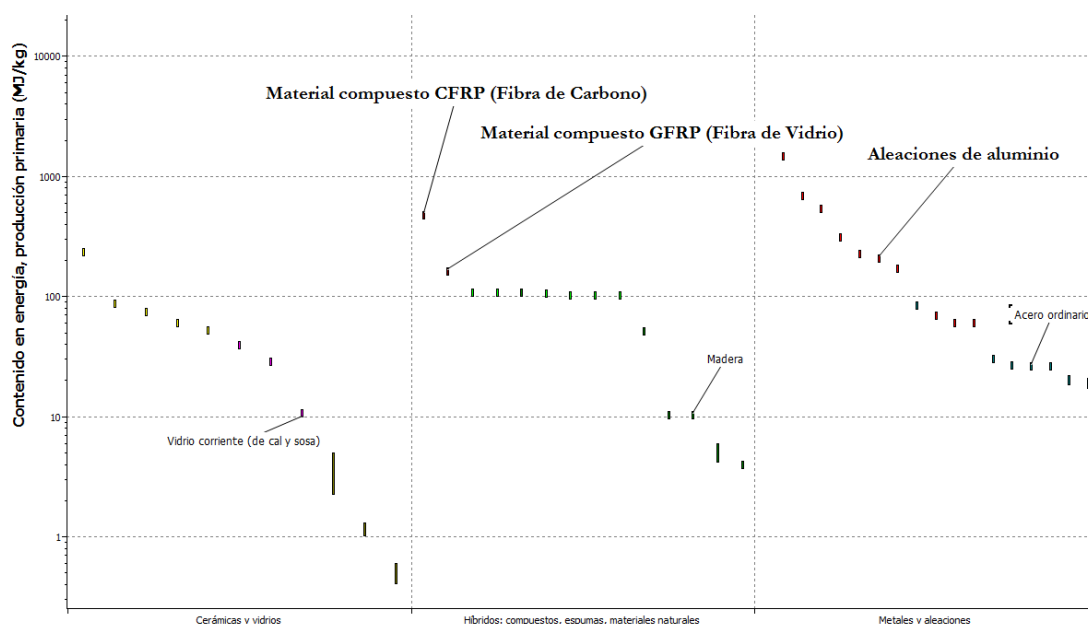


Ilustración 17: Comparativa de contenido en energía para la producción primaria. Fuente: (9).

El contenido en energía para la producción primaria del material compuesto GFRP (fibra de vidrio) es de entre 150-160 MJ/kg, inferior entre otros al del material compuesto CFRP (fibra de carbono) que es de entre 453-500 MJ/kg y al del aluminio que es de entre 198-219 MJ/kg, pero superior a la mayoría de materiales. El material con mayor contenido en energía para la producción primaria es el oro entre 240.000-265.000 MJ/kg y el menor entre los principales materiales es el de la piedra entre 0,4-0,6 MJ/kg.

Siguiendo con la evaluación de los resultados obtenidos en la tabla 5, analizada anteriormente la elevada aportación de la fase material, se extrae posteriormente que las etapas de fabricación, transporte y desecho tan sólo contribuyen un 7,7 % del consumo energético y un 9,6% de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

Posteriormente, una vez finalizada la vida útil se obtienen los resultados de consumo energético y de huella de CO₂ de reaprovechamiento al final de su vida útil para la vía de gestión empleada para su valorización (en este primer caso, la reutilización). Se observa que tanto el consumo energético como la huella de CO₂ obtenidos son los valores

inversos a los obtenidos en la etapa material. Ello significa que con la reutilización se valoriza más del 90% del componente.

Por otra parte, el resultado del total (tras la etapa de final de vida) se realiza para observar tanto el consumo energético como la huella después de realizar la vía de gestión para determinar cuantitativamente la acción de la estrategia de gestión, que para la reutilización resulta ser de 80 tera julios y de 6,3 toneladas respectivamente.

En la ilustración 18, se aprecia gráficamente como el *consumo energético* de la fase material como el de la de reaprovechamiento al final de su vida útil, son inversos como se comentó anteriormente.

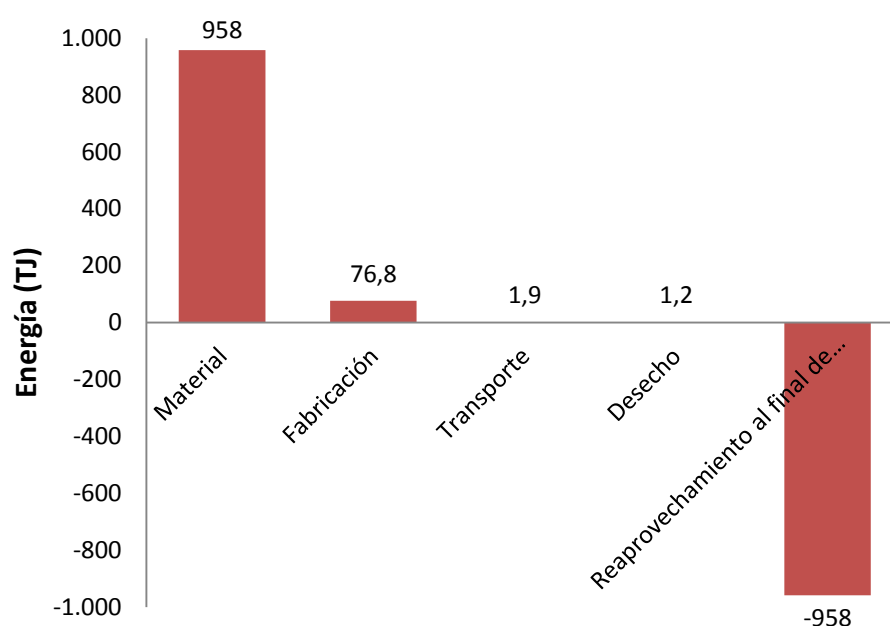


Ilustración 18: Consumo energético por etapa (reutilización). Fuente: (8).

Por otra parte, la etapa que representa el coste de retirada de la para su posterior reutilización, es decir, la etapa de desecho es de 1,2 TJ.

En la ilustración 19, donde se muestra la *huella de CO₂* en cada etapa, donde se aprecia que la fase material emite 59,9 toneladas de CO₂ y la fase de reaprovechamiento justo el valor inverso. El valor negativo de huella de carbono indica que dicho proceso no es contaminante. Al contrario, significa que en la reutilización se captura y almacena el contaminante, se comprime, se transforma en líquido y se transporta a un lugar cercano. Después, se puede bombear al interior de la tierra. Es lo que se llama la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono.

La fase de desecho, por su parte, provoca un impacto de 0,08 t.

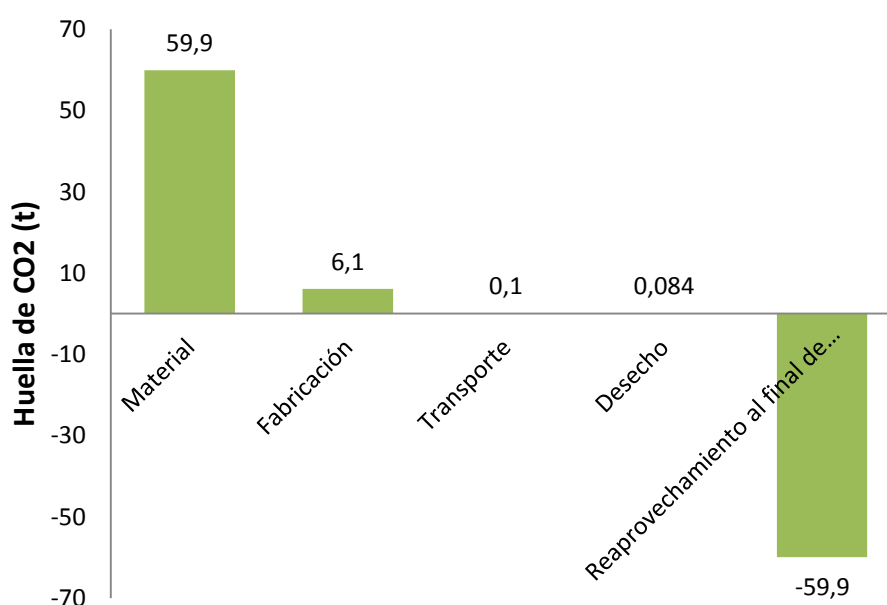


Ilustración 19: Huella de CO₂ por etapa (reutilización). Fuente: (8).

La tabla 5 muestra el equivalente de carga ambiental anual de la pala, es decir, tanto el consumo energético como la huella de CO₂ de la fase de vida del producto dividida entre el número de años promedio de actividad.

Análisis energético:	Energía (TJ)/ año	CO ₂ (t)/ año
Equivalente carga ambiental anual (promedio de más de 22,5 años de vida del producto) :	46,1	2,94

Tabla 5: Equivalente de carga ambiental anual. Fuente: (8).

A continuación, se muestra un desglose detallado de las fases de vida individuales tanto del análisis energético como de la huella de carbono del modo en el cual opera la auditoría del software:

La tabla 6 muestra los datos introducidos en la fase del material, en la cual se muestra una pala constituida de material compuesto GFRP isotrópico (matriz epoxídica reforzada con fibra de vidrio). Que sea isotrópico significa que consta de una disposición de capas de fibra de vidrio superpuestas en distintas direcciones para que el material tenga buenas propiedades hacia cualquier dirección. En el contenido de reciclado se va a considerar 0%, ya que se considera que la pala fue fabricada con material compuesto virgen. En cuanto a la masa total, se considerará que es de unos 6.000 kg, ya que se considerará una longitud de aspa de 50 metros, a pesar de haber modelos de diversas longitudes.

Componente	Material	Contenido de reciclado (%)	Cantidad	Masa total (t)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Material compuesto GFRP (Fibra de vidrio)	Virgen (0%)	1	6	958	59,9

Tabla 6: Etapa del material. Fuente: (8).

Para la fabricación de la pala (tabla 7), se considerará que se produjo por mediante un moldeo por transferencia de resina (RTM), el cual permite fabricar formas complejas en composites reforzados por fibras sin incurrir en altos costes de utillaje. Como se puede observar en la ilustración 20, el proceso de fabricación de las palas es laborioso debido a la gran dimensión de estas.



Ilustración 20: Proceso de fabricación de una pala. Fuente: (28).

Componente	Proceso	Cantidad procesada (t)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Moldeo por transferencia de resina	6	76,8	6,1

Tabla 7: Etapa de fabricación. Fuente: (8).

El moldeo por transferencia de resina emplea un molde cerrado, con dos o más partes, normalmente de polímeros reforzados con vidrio o aleaciones ligeras, con puntos de inyección y agujeros de ventilación para permitir que el aire se escape (ilustración 21). El refuerzo se corta en patrones adaptados a la pieza, y se coloca en el molde junto con los añadidos y accesorios necesarios. Posteriormente, se cierra el molde y se inyecta la resina termoestable de baja viscosidad (normalmente poliéster) a baja presión (aproximadamente 2MPa) a través de un cabezal en el que se mezclan endurecedor y resina. En el molde se realiza el curado a temperatura ambiente. La fluidez de la resina junto a la baja presión de inyección permite que la vida útil de la maquinaria sea larga y el proceso de bajo coste.

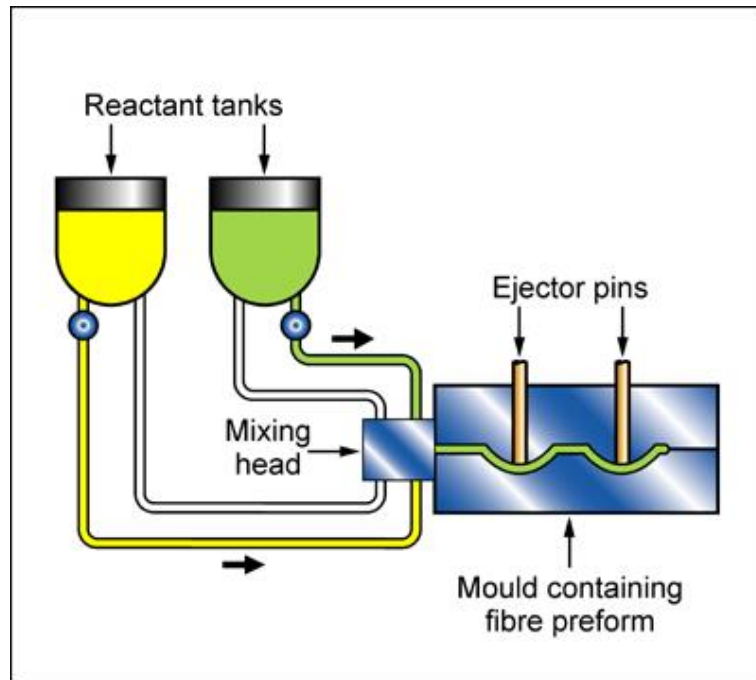


Ilustración 21: Esquema de un proceso de moldeo por transferencia de resina. Fuente: (9).

Líneas de diseño: el moldeo por transferencia de resina se utiliza cada vez más en grandes piezas de polímero reforzado con fibras. Las formas pueden ser complejas, permitiendo la fabricación de costillas, refuerzos e insertos. Se pueden insertar durante el moldeo paneles de espuma para reducir el peso de la pieza.

Aspectos técnicos: el RTM puede utilizarse con un amplio rango de resinas: casi cualquier resina termoestable con baja viscosidad como las de poliéster, epoxis, vinil-éster y fenólicas. Los refuerzos ocupan habitualmente entre el 25 y el 30% del volumen con vidrio o carbono con forma de tejido en fibra continua.

Usos típicos: la técnica RTM se utiliza para la fabricación de estructuras grandes de materiales compuestos tales como trampillas, cerramientos para tierra comprimida, puertas y paneles laterales de automóviles, palas de hélices, remos de canoa, cascos de embarcaciones, depósitos de agua, bañeras, paneles de techo y escotillas de aviones.

Economía: los gastos en utillaje son bajos y el proceso no requiere una mano de obra especialmente intensa, lo que lo hace económicamente atractivo.

Medio ambiente: es fácil controlar las emisiones provenientes del molde cerrado con una buena ventilación. La exposición del trabajador a los gases químicos nocivos es mucho menor que en cualquier otro proceso de moldeo para composites alternativo.

Después de la fabricación de la pala, se considerará la etapa de transporte (tabla 8), la cual se va a dividir en 2 tramos: en primer lugar, desde el lugar de fabricación hasta el lugar de uso y posteriormente en la etapa de final de vida, es decir, unos 20 años más tarde, desde el lugar de uso hacia el destino de gestión. Los lugares se han tomado de forma anecdótica para el estudio. El transporte de un aspa por carretera es muy complejo debido a su longitud como se puede observar en la ilustración 22, por ello cuando la pala es retirada al final de su vida útil, si ha de ser transportarla hacia una planta de tratamiento suele practicársele un etapa de corte en el lugar del residuo para poder transportarla de forma más ergonómica y segura.



Ilustración 22: Transporte de una pala por carretera. Fuente: www.directindustry.es

Tramo	Tipo de transporte	Distancia (km)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (kg)
Murcia – Tarifa (Instalación)	Camión de 32 toneladas	550	1,5	0,1
Tarifa – Málaga (Retirada)	Camión de 32 toneladas	150	0,4	0,03
Total			1,9	0,13

Tabla 8: Etapa de transporte. Fuente: (8).

La etapa de desecho (tabla 9) constituye la fase de preparación para el final de vida del componente. Consiste en la etapa que mide el coste energético y el impacto ambiental que supone retirar el material de su actividad y prepararlo para la vía de gestión pertinente.

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Reutilización	1,2	0,08

Tabla 9: Etapa de desecho. Fuente: (8).

En la fase de reaprovechamiento al final de su vida útil (tabla 10), la reutilización consigue tanto una huella de CO₂ como un coste energético negativo, lo cual se entiende como la energía que se gana con ese tipo de valorización.

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Reutilización	-958	-59,9

Tabla 10: Etapa de reaprovechamiento al final de su vida útil. Fuente: (8).

Cálculos de consumo energético y huella de carbono en la etapa de uso de la pala (tabla 11): Los datos de consumo energético y la huella de CO₂ de la etapa de uso o de funcionamiento de la pala en el aerogenerador son la parte esencial y dominante de la vida útil, pero se han tenido que calcular aparte con ayuda de una hoja Excel debido a que en el software no era posible tener en cuenta algunas de las variables necesarias para su cálculo.

Componente	Potencia del aerogenerador	Media de horas de funcionamiento al año * 22,5 años	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	1 MW	2500 * 22,5 = 56.250 h.	-129.000	7733,3

Tabla 11: Etapa de uso de la pala.

Durante la etapa de uso la pala es capaz de generar -129.000 TJ de energía a lo largo de los 22,5 años de funcionamiento, lo que supone unos -5733 TJ al año.

El impacto ambiental es de 7.733,3 toneladas a lo largo de 22,5 años, lo que supone unas emisiones contaminantes de 343,7 t/año.

5.1.2.- Reciclado bajo.

El reciclado bajo es el proceso de convertir materiales de desecho o productos inútiles en nuevos materiales o productos de menor calidad y funcionalidad reducida.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para la opción de reciclado bajo como estrategia de gestión al final de la vida útil del aspa:

Etapas	Energía (TJ)	Energía (%)	CO₂ (t)	CO₂ (%)
Material	958	92,1	59,9	90,2
Fabricación	76,8	7,4	6,1	9,3
Transporte	1,9	0,2	0,1	0,2
Desecho	3	0,3	0,2	0,3
Total (durante la vida útil)	1.039,7	100	66,4	100
Reaprovechamiento al final de vida útil	-0,6		-0,04	
Total (tras la etapa del final de vida)	1.039,1		66	

Tabla 12: Resumen de resultados para reciclado bajo como vía de gestión. Fuente: (8).

En la tabla 12, se puede observar que como ocurría anteriormente, el tipo de material constituye la fase dominante de la vida útil (que comprende hasta la fase de desecho inclusive) del componente, constituyendo una aportación de un 92,1% de consumo energético y un 90,2% de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil. Esta aportación es tan alta por lo explicado anteriormente, es decir, tanto por el elevado volumen del material como por el contenido en energía para la producción primaria del material.

Las etapas de fabricación, transporte y desecho tan sólo contribuyen un 7,9 % del consumo energético y un 9,8 % de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

Posteriormente, una vez finalizada la vida útil se obtienen los resultados de consumo energético y de huella de CO₂ de reaprovechamiento al final de su vida útil para la vía de gestión empleada para su valorización (en este segundo caso, para el reciclado bajo). Se aprecia que no se logra recuperar más que una mínima parte en el reaprovechamiento al final de su vida útil. El consumo energético es de -0,6 TJ, lo cual representa al menos un mínimo reaprovechamiento energético.

Por otra parte, el resultado del total (tras la etapa de final de vida) para el reciclado bajo resulta ser de 1.039,1 TJ y de 66 t respectivamente. En este caso, la acción de la vía de gestión es ínfima.

En la ilustración 23, se aprecia tanto la elevada aportación de la etapa del material como una pequeña valorización en la fase de reaprovechamiento.

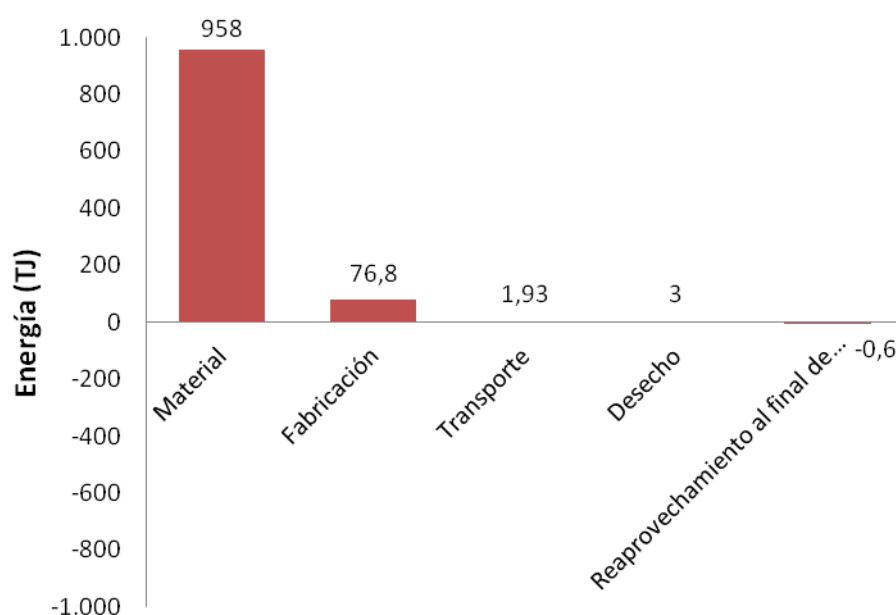


Ilustración 23: Consumo energético por etapa (reciclado bajo). Fuente: (8).

Por otra parte, la fase de desecho consume 3 TJ de energía. Este valor representa el coste de retirada de la pala para su disposición para gestionarlo, es decir, lo que cuesta retirar el aspa y prepararla para efectuar el reciclado bajo. Como se puede observar atrás en la tabla resumen (tabla 12), la fase de desecho constituye el 0,3% del total de consumo energético.

En la ilustración 24, donde se muestra la *huella de CO₂* en cada etapa, se aprecia que la fase material emite 59,9 toneladas de CO₂ y la fase de reaprovechamiento tiene una huella de carbono negativa de 0,04 toneladas, lo que significa que el reciclado bajo no solo no emite gases de efecto invernadero sino que además retiene unos 40 kg de emisiones.

La fase de desecho, por su parte, provoca un impacto de 0,2 toneladas, mayor que para la reutilización que era de 0,08 toneladas.

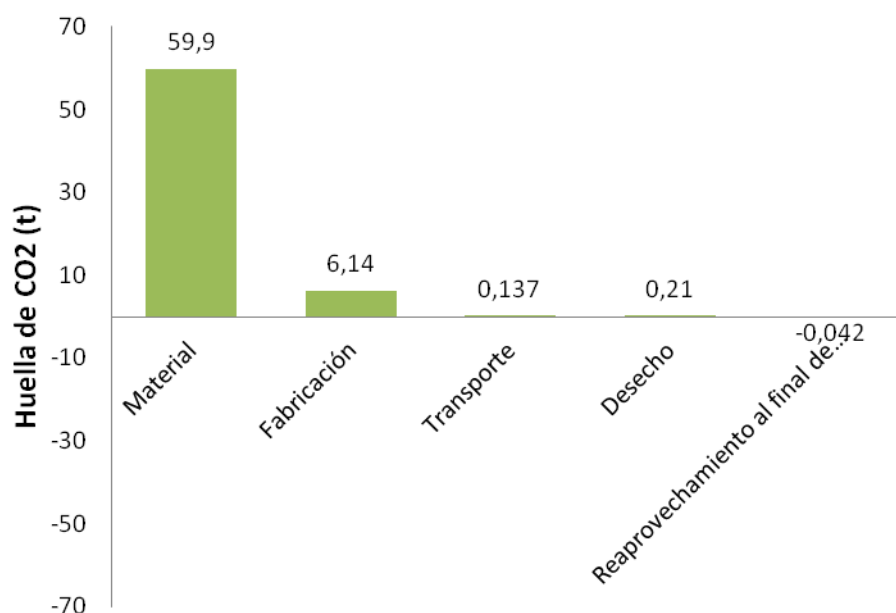


Ilustración 24: Huella de CO₂ por etapa (reciclado bajo). Fuente: (8).

La tabla 14 muestra el equivalente de carga ambiental anual de la pala, es decir, tanto el consumo energético como la huella de CO₂ de la fase de vida del producto dividida entre el número de años promedio de actividad.

Análisis energético:	Energía (TJ)/ año	CO₂ (t)/ año
Equivalente carga ambiental anual (promedio de más de 22,5 años de vida del producto) :	46,6	3

Tabla 13: Equivalente de carga ambiental anual. Fuente: (8).

A continuación, se muestra un desglose detallado de las fases de vida individuales tanto del análisis energético como de la huella de carbono del modo en el cual opera la auditoría del software:

Tanto para la etapa del material, fabricación, transporte y uso los resultados son idénticos para todos los casos (ver el apartado anterior: 5.1.1.- Reutilización), por lo que a partir de ahora no será necesario mostrar los cálculos que sean comunes para todos los casos. Por tanto, a partir de ahora solo se muestran los resultados de consumo energético y la eco-huella obtenidas para las etapas de desecho y para la de reaprovechamiento al final de su vida útil, que son los datos variables para cada caso.

La etapa de desecho (tabla 15) constituye la fase de preparación para el final de vida del componente. Consiste en la etapa que mide el coste energético y el impacto ambiental que supone retirar el material de su actividad y prepararlo para la vía de gestión pertinente. Sus resultados son:

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Reciclado bajo	3	0,2

Tabla 14: Etapa de desecho. Fuente: (8).

En la fase de reaprovechamiento al final de su vida útil (tabla 16), el reciclado bajo consigue tanto una huella de CO₂ como un coste energético negativo. Sus resultados son:

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Reciclado bajo	-0,6	-0,04

Tabla 15: Etapa de reaprovechamiento al final de su vida útil. Fuente: (8).

5.1.3.- Incineración.

La incineración es un proceso térmico de valorización de residuos cuyo fin es disminuir la cantidad de residuo y aprovechar la energía que contiene. Los aspectos medioambientales que causan mayor preocupación son las emisiones atmosféricas, especialmente las dioxinas y furanos, y las escorias y cenizas formadas. Por otra parte, los aspectos socioeconómicos ponen de manifiesto que se requieren elevadas inversiones, grandes costes de operación y, en general, una fuerte oposición popular.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para la opción de incineración como estrategia de gestión del aspa al final de su vida útil:

Etapas	Energía (TJ)	Energía (%)	CO₂ (t)	CO₂ (%)
Material	958	92,1	59,9	90,2
Fabricación	76,8	7,4	6,1	9,3
Transporte	1,9	0,2	0,1	0,2
Desecho	3	0,3	0,2	0,3
Total (durante la vida útil)	1.039,7	100	66,4	100
Reaprovechamiento al final de vida útil	-18,5		4,7	
Total (tras la etapa del final de vida)	1.021,2		71,1	

Tabla 16: Resumen de cálculos para la incineración como vía de gestión. Fuente: (8).

En la tabla 17, se vuelve a observar nuevamente como en los casos anteriores de que la etapa del material constituye la fase dominante de la vida útil (que comprende hasta la fase de desecho inclusive) del componente, constituyendo una aportación de un 92,1% de consumo energético y un 90,2% de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil. Por lo que las etapas de fabricación, transporte y desecho tan sólo contribuyen un 7,9 % del consumo energético y un 9,8 % de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

Posteriormente, una vez finalizada la vida útil se obtienen los resultados de consumo energético y de huella de CO₂ de reaprovechamiento al final de su vida útil para la vía de gestión empleada para su valorización (en este tercer caso, para la incineración). Se aprecia que no se logra recuperar más que una mínima parte en el reaprovechamiento al final de su vida útil. El consumo energético es de -18,5 TJ, lo cual representa un mínimo reaprovechamiento energético, mucho menor que en el caso de la reutilización aunque mayor que en el caso del reciclado bajo.

Por otra parte, el resultado del total (tras la etapa de final de vida) para la incineración resulta ser de 1.021,2 TJ y de 71,1 t respectivamente, es decir, que dicha vía de gestión provoca que el consumo energético baje, pero que el impacto ambiental crezca.

En la ilustración 25, se aprecia tanto la elevada aportación de la etapa del material como una pequeña valorización (en comparación con los valores de consumo energéticos durante la etapa de vida del aspa) en la fase de reaprovechamiento.

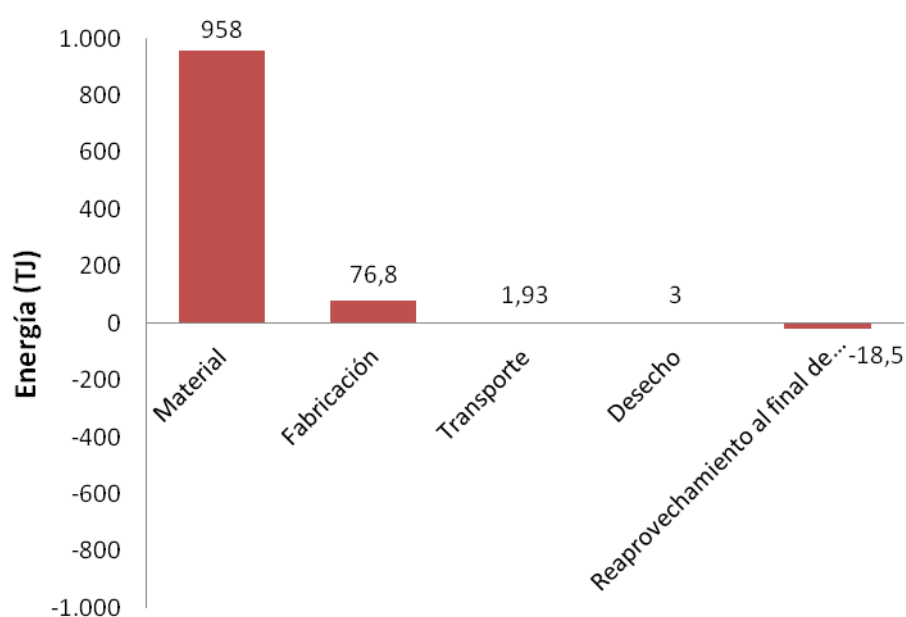


Ilustración 25: Consumo energético por etapa (incineración). Fuente: (8).

Por otra parte, la fase de desecho consume 3 TJ de energía. Este valor representa el coste de retirada de la pala para su disposición para gestionarlo, es decir, lo que cuesta retirar el aspa y prepararla para incinerarla. Este valor es igual que para el caso del reciclado bajo. En cambio, para la reutilización el consumo energético era de 1,2 TJ, lo cual significa que el coste de preparación para reutilizar era 1,8 TJ menor.

En la ilustración 26, donde se muestra la *huella de CO₂* en cada etapa, se aprecia que la fase material emite 59,9 toneladas de CO₂ y la fase de reaprovechamiento tiene una

huella de carbono positiva de 4,7 t. Ello indica que se trata de un proceso de gestión muy contaminante.

La fase de desecho, por su parte, provoca un impacto de 0,2 t. Esto significa que al preparar el aspa para incinerarla se produce dicha emisión de gases de efecto invernadero.

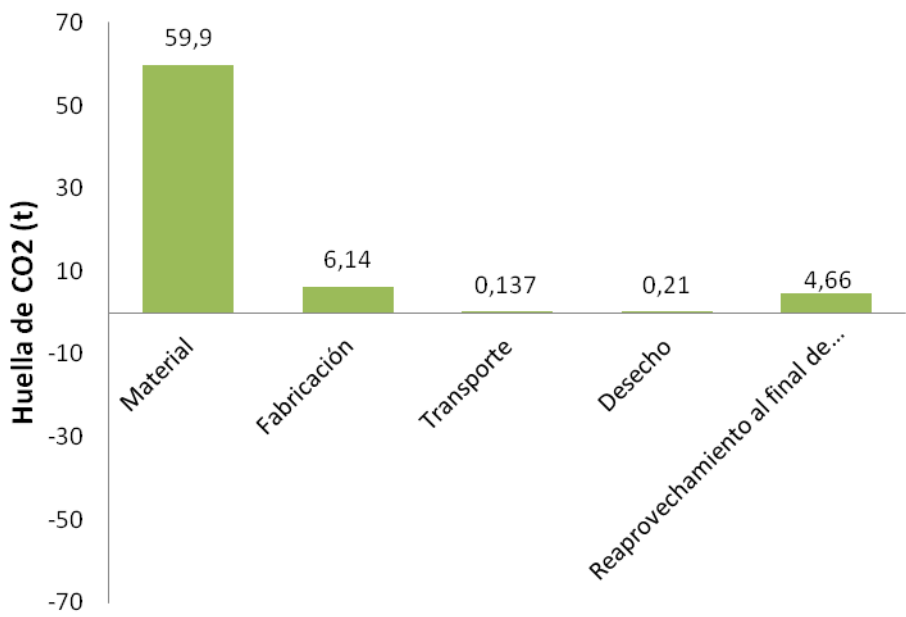


Ilustración 26: Huella de CO₂ por etapa (incineración). Fuente: (8).

La tabla 18 muestra el equivalente de carga ambiental anual de la pala, es decir, tanto el consumo energético como la huella de CO₂ de la fase de vida del producto dividida entre el número de años promedio de actividad.

Análisis energético:	Energía (TJ)/ año	CO ₂ (t)/ año
Equivalente carga ambiental (promedio de más de 22,5 años de vida del producto) :	46,6	3

Tabla 17: Equivalente de carga ambiental anual. Fuente: (8).

A continuación, se muestra un desglose detallado de las fases de vida individuales tanto del análisis energético como de la huella de carbono del modo en el cual opera la auditoría del software:

Volver a recordar que tanto para la etapa del material, fabricación, transporte y uso los resultados son idénticos para todos los casos (consultar apartado: 5.1.1.- Reutilización), por tanto no será necesario volverlos a indicarlos.

La etapa de desecho (tabla 19) constituye la fase de preparación para el final de vida del componente. Consiste en la etapa que mide el coste energético y el impacto ambiental que supone retirar el material de su actividad y prepararlo para la vía de gestión pertinente. Sus resultados son:

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Incineración	3	0,2

Tabla 18: Etapa de desecho. Fuente: (8).

En la fase de reaprovechamiento al final de su vida útil (tabla 20), la incineración presenta un coste energético negativo, lo cual se entiende como la energía que se gana con ese tipo de valorización y una huella de CO₂ positiva. Sus resultados son:

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Incineración	-18,5	4,7

Tabla 19: Etapa de reaprovechamiento al final de su vida útil. Fuente: (8).

5.1.4.- Vertederos.

Los vertederos son los lugares en los cuales se depositan los residuos. En cuanto a las vías de gestión, corresponde siempre a la opción más desfavorable, y por tanto, debe ser siempre la última opción a tener en cuenta.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos cuando el lugar de destino de las aspas es el vertedero:

Etap	Energía (TJ)	Energía (%)	CO₂ (t)	CO₂ (%)
Material	958	92,3	59,9	90,4
Fabricación	76,8	7,4	6,1	9,3
Transporte	1,9	0,2	0,1	0,2
Desecho	1,2	0,1	0,084	0,1
Total (durante la vida útil)	1.039,7	100	66,4	100
Reaprovechamiento al final de vida útil	0		0	
Total (tras la etapa del final de vida)	1.039,7		66,4	

Tabla 20: Resumen de cálculos para la deposición en vertederos. Fuente: (8).

En la tabla 21, como en todos los casos anteriores, el material (la fibra de vidrio) constituye la fase dominante de la vida útil (que comprende hasta la fase de desecho inclusive) del componente, constituyendo una aportación de un 92,3% de consumo energético y un 90,4% de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

Las etapas de fabricación, transporte y desecho tan sólo contribuyen un 7,7 % del consumo energético y un 9,6 % de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

En la deposición en vertederos no es propiamente un tratamiento de reaprovechamiento de residuos por lo que en este caso es 0, tanto el consumo energético como la huella de carbono. Por tanto, el resultado del total (tras la etapa de final de vida) es igual al total (durante la vida útil).

En la ilustración 27, se aprecia tanto la elevada aportación de la etapa del material como que lógicamente no existe valorización alguna después de su vida útil.

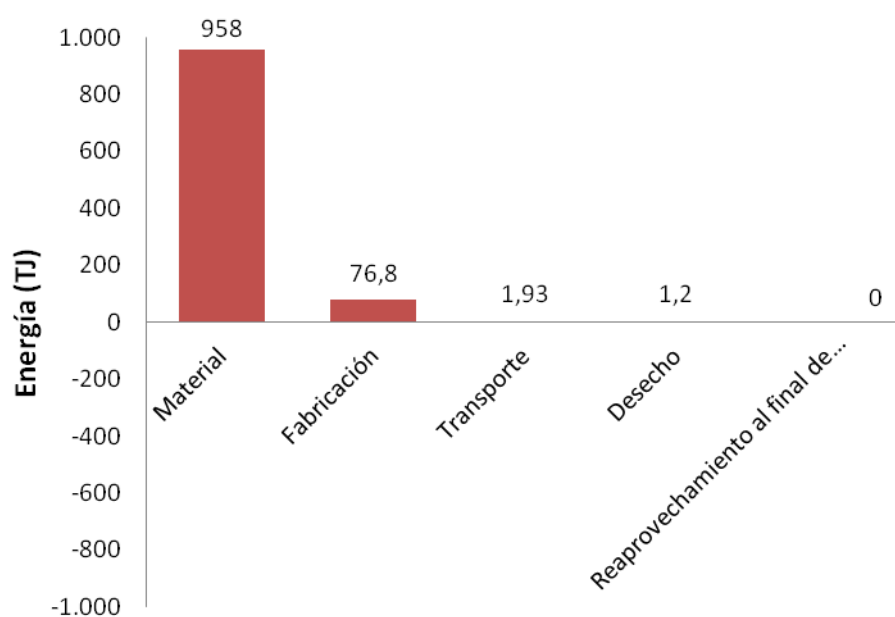


Ilustración 27: Consumo energético por etapa (deposición en vertederos). Fuente: (8).

Por otra parte, la fase de desecho en este caso consume 1,2 TJ de energía, es decir, igual que para la reutilización y menor que para el reciclado bajo o la incineración en las que era de 3 TJ.

En la ilustración 28, donde se muestra la *huella de CO₂* en cada etapa, se aprecia que la fase material emite 59,9 toneladas de CO₂ y la fase de reaprovechamiento tiene una huella de carbono nula.

La fase de desecho, por su parte, provoca un emisión de 0,08 toneladas, igual que en la reutilización.

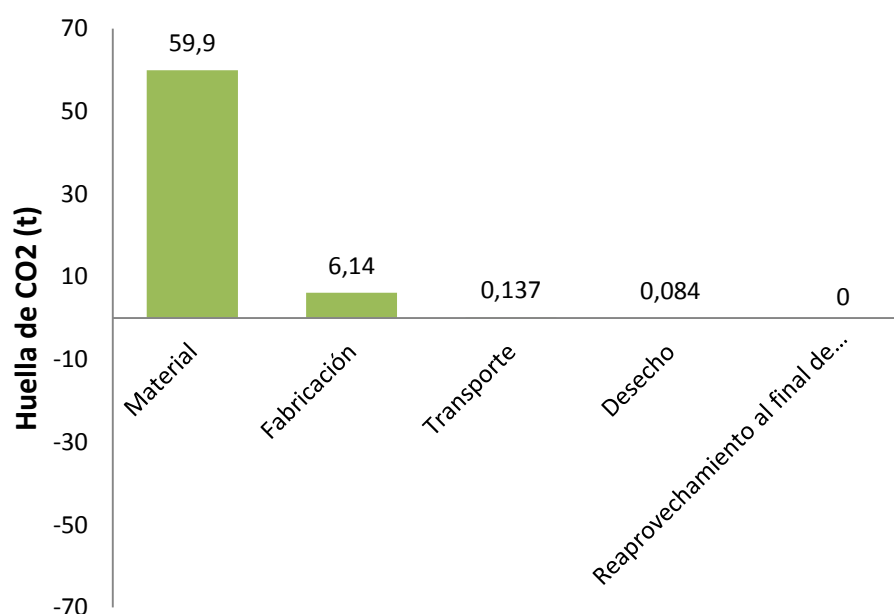


Ilustración 28: Huella de CO₂ por etapa (deposición en vertederos). Fuente: (8).

La tabla 22 muestra el equivalente de carga ambiental anual de la pala, es decir, tanto el consumo energético como la huella de CO₂ de la fase de vida del producto dividida entre el número de años promedio de actividad.

Análisis energético:	Energía (TJ)/ año	CO ₂ (t)/ año
Equivalente carga ambiental anual (promedio de más de 22,5 años de vida del producto) :	46,6	3

Tabla 21: Equivalente de carga ambiental anual. Fuente: (8).

A continuación, se muestra un desglose detallado de las fases de vida individuales tanto del análisis energético como de la huella de carbono del modo en el cual opera la auditoría del software:

Para la etapa del material, fabricación, transporte y uso (consultar apartado: 5.1.1.- Reutilización).

La etapa de desecho (tabla 23) constituye la fase de preparación para el final de vida del componente. Consiste en la etapa que mide el coste energético y el impacto ambiental que supone retirar el material de su actividad. Sus resultados son:

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Vertederos	1,2	0,084

Tabla 22: Etapa de desecho. Fuente: (8).

En la fase de reaprovechamiento al final de su vida útil (tabla 24), tanto la huella de CO₂ como el coste energético son nulos, porque no hay reaprovechamiento y por tanto no hay impacto asociado a dicha etapa.

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Vertederos	0	0

Tabla 23: Etapa de reaprovechamiento al final de vida útil. Fuente: (8).

5.1.5.- Re-fabricación.

La re-fabricación es una opción de gestión que propone el software de materiales para la pala de fibra de vidrio. Consiste en la acción de devolver a un producto usado al menos su rendimiento original, garantizando que es equivalente o mejor que el del producto fabricado de nuevo.

- Desde el punto de vista de un cliente, el producto re-fabricado se puede considerar como si fuera el mismo que el equipo nuevo.
- La re-fabricación no utilizará piezas reparadas ni reacondicionadas.
- La re-fabricación supone desmontar el producto, restaurar y sustituir los componentes y comprobar las piezas individuales y el producto entero para asegurarse de que se encuentra dentro de las especificaciones de diseño originales.
- Se espera que el rendimiento tras la re-fabricación se corresponda como mínimo con la especificación de rendimiento original, y que cualquier garantía subsiguiente sea en general como mínimo igual a la de un producto nuevo.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos en el software para la opción de re-fabricación del aspa al final de su vida útil:

Etapas	Energía (TJ)	Energía (%)	CO₂ (t)	CO₂ (%)
Material	958	92,3	59,9	90,4
Fabricación	76,8	7,4	6,1	9,3
Transporte	1,9	0,2	0,1	0,2
Desecho	1,2	0,1	0,084	0,1
Total (durante la vida útil)	1.038	100	66,2	100
Reaprovechamiento al final de vida útil	-940		-58,7	
Total (tras la etapa del final de vida)	98		7,5	

Tabla 24: Resumen de resultados para re-fabricación. Fuente: (8).

Como en todos los casos, en la tabla 25 se observa que el tipo de material constituye la fase dominante de la vida útil (que comprende hasta la fase de desecho inclusive) del componente, constituyendo una aportación de un 92,3% de consumo energético y un 90,4% de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

Las etapas de fabricación, transporte y desecho tan sólo contribuyen un 7,7 % del consumo energético y un 9,6 % de huella de carbono, respectivamente sobre el total durante la vida útil.

Posteriormente, una vez finalizada la vida útil se obtienen los resultados de consumo energético y de huella de CO₂ de reaprovechamiento al final de su vida útil para la vía de gestión empleada para su valorización (en este caso, para la re-fabricación). Se aprecia que se logra recuperar gran parte del residuo en el reaprovechamiento al final de su vida útil. El consumo energético es de -940 TJ.

El resultado del total (tras la etapa de final de vida) para la re-fabricación es de 98 TJ y de 7,5 t respectivamente, lo que indica que la re-fabricación disminuye casi un 90% tanto el consumo energético como el nivel de emisiones contaminantes.

En la ilustración 29, se aprecia gráficamente como el *consumo energético* de la fase material como el de la de reaprovechamiento al final de su vida útil, son prácticamente inversos como se comentó anteriormente.

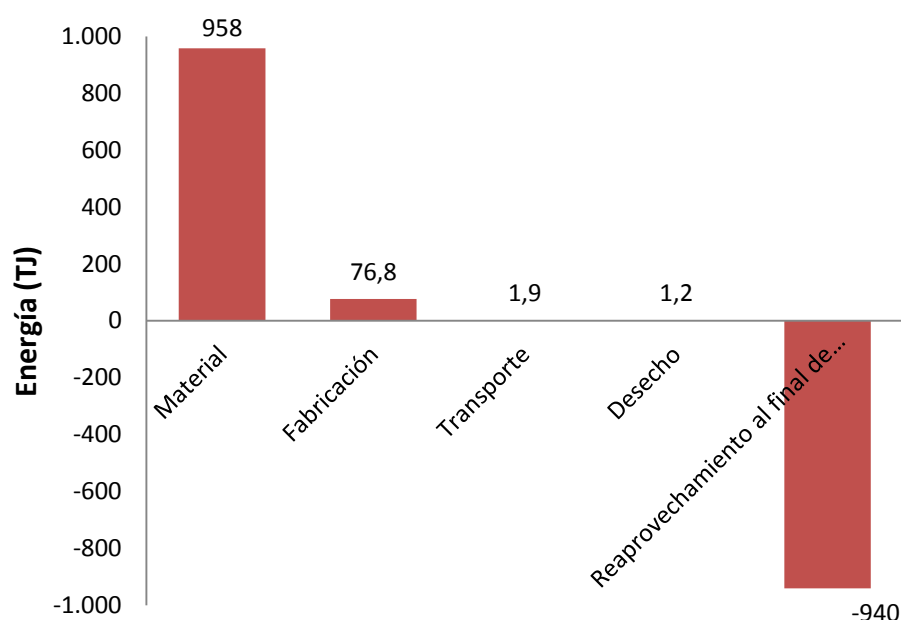


Ilustración 29: Consumo energético por etapa (re-fabricación). Fuente: (8).

La fase de desecho consume 1,2 TJ de energía, igual que en la reutilización y en la deposición en vertederos y menor que en el reciclado bajo y la incineración en que el consumo se elevaba hasta los 3 TJ.

En la ilustración 30, donde se muestra la *huella de CO₂* en cada etapa, se aprecia que la fase material emite 59,9 toneladas de CO₂ y la fase de reaprovechamiento -58,7.

La fase de desecho, por su parte, provoca una emisión de 0,084 t.

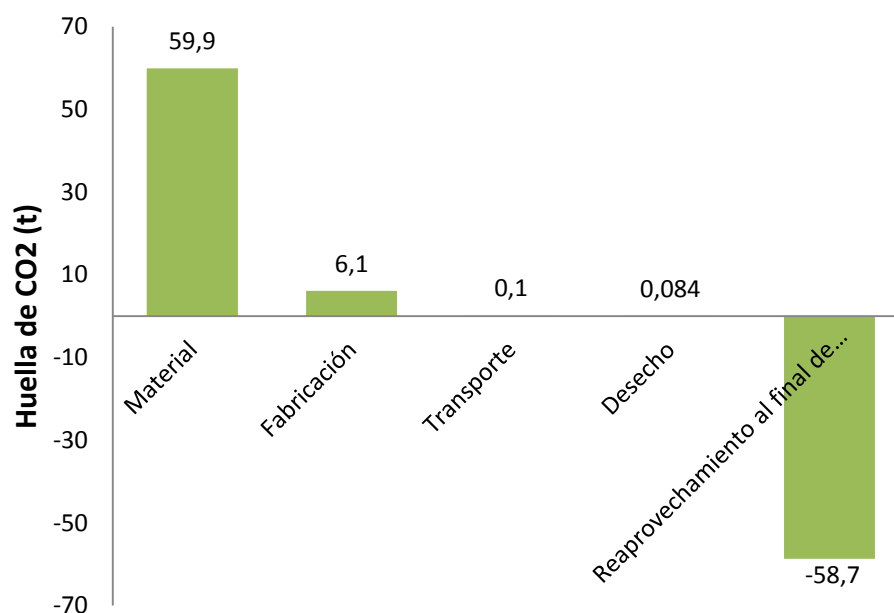


Ilustración 30: Huella de CO₂ por etapa (re-fabricación). Fuente: (8).

La tabla 26 muestra el equivalente de carga ambiental anual de la pala, es decir, tanto el consumo energético como la huella de CO₂ de la fase de vida del producto dividida entre el número de años promedio de actividad.

Análisis energético:	Energía (TJ)/ año	CO ₂ (t)/ año
Equivalente carga ambiental anual (promedio de más de 22,5 años de vida del producto) :	46,1	2,95

Tabla 25: Equivalente de carga ambiental anual. Fuente: (8).

A continuación, se muestra un desglose detallado de las fases de vida individuales (la etapa de material, fabricación, transporte y uso son iguales para todos los casos) tanto del análisis energético como de la huella de carbono del modo en el cual opera la auditoría del software:

La etapa de desecho (tabla 27) constituye la fase de preparación para el final de vida del componente. Consiste en la etapa que mide el coste energético y el impacto ambiental que supone retirar el material de su actividad y prepararlo para la vía de gestión pertinente.

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Re-fabricación	1,2	0,084

Tabla 26: Etapa de desecho. Fuente: (8).

En la fase de reaprovechamiento al final de su vida útil (tabla 28), la re-fabricación consigue tanto una huella de CO₂ como un coste energético negativo, lo cual se entiende como la energía que se gana con ese tipo de valorización.

Componente	Final de vida (tipo de gestión)	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Pala	Re-fabricación	-940	-58,7

Tabla 27: Etapa de reaprovechamiento al final de su vida útil. Fuente: (8).

5.1.6.- Resumen de resultados obtenidos para la pala de fibra de vidrio.

En este apartado se van a resumir los resultados importantes para la comparativa entre las 5 vías de gestión anteriormente planteadas.

En la tabla 29, se reúnen los resultados obtenidos en la etapa de desecho para cada vía de gestión:

Estrategia de gestión:	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Reutilización	1,2	0,08
Reciclado bajo	3	0,2
Incineración	3	0,2
Vertederos	1,2	0,08
Re-fabricación	1,2	0,08

Tabla 28: Tabla resumen de la etapa de desecho para cada vía de gestión. Fuente: (8)

La reutilización, la deposición en vertederos y la re-fabricación consumen 1,2 TJ y 0,08 toneladas de huella de carbono. Por su parte, el reciclado bajo y la incineración consumen 3 TJ y 0,2 toneladas de huella de CO₂. Ello significa que el coste de preparación para efectuar tanto un reciclado bajo como una incineración es mayor que el de reutilización, re-fabricación o la deposición en vertederos.

En la tabla 30, se reúnen los resultados obtenidos en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión:

Estrategia de gestión:	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Reutilización	-958	-59,9
Reciclado bajo	-0,6	-0,04
Incineración	-18,5	4,7
Vertederos	0	0
Re-fabricación	-940	-58,7

Tabla 29: Tabla resumen de capacidad reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

En cuanto al consumo energético, la reutilización es el tipo de gestión más beneficiosa tanto energéticamente como medioambientalmente. Muy similares en porcentaje son los valores obtenidos en la re-fabricación. En tercer y en cuarto lugar se sitúan la incineración y el reciclado bajo, respectivamente. Por último, la opción más desfavorable es la deposición en vertederos. En la ilustración 31, se puede apreciar gráficamente:

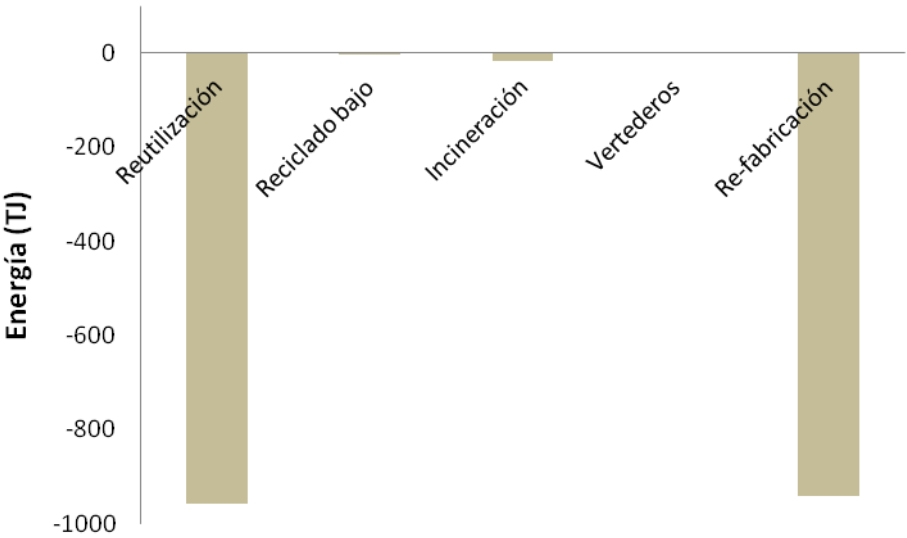


Ilustración 31: Consumo energético en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

Y en cuanto al impacto ambiental (ver gráficamente en la ilustración 32), el orden es similar salvo en la incineración que resulta ser el tipo de gestión que emite mayor contaminación ya que presenta huella de carbono positiva. La deposición en vertederos tiene huella de carbono neutra porque no presenta una etapa de reaprovechamiento, no porque no pueda contaminar una vez esté tirada en el vertedero.

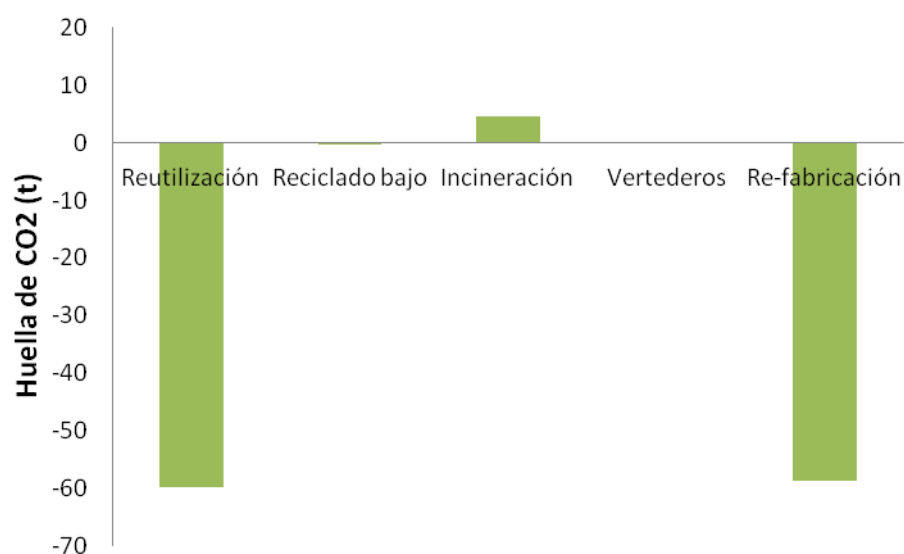


Ilustración 32: Huella de carbono en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

Expuestos los resultados, se puede determinar que para la gestión de una pala de material compuesto de fibra de vidrio el orden de preferencia es el siguiente:

Reutilización \approx Re-fabricación > Reciclado bajo > Incineración > Deposición en vertederos.

5.2.- Cálculos para la valorización de palas de otros componentes.

Una vez realizados los cálculos que determinaron la vía de gestión más eficiente en la gestión de residuos de palas compuestas de material compuesto de fibra de vidrio, se va a proceder a efectuar los mismos cálculos considerando dos nuevos supuestos: que la pala estuviese fabricada de material compuesto de fibra de carbono o que la pala fuese de aluminio, ya que aunque en menor medida, se trata de dos tipos de materiales también empleados en la fabricación de aerogeneradores.

5.2.1.- Cálculos para una pala de fibra de carbono: resumen de resultados obtenidos.

Siguiendo exactamente la metodología anterior de los cálculos para la pala de fibra de vidrio, en este caso cuenta de que la pala en este caso sea de material compuesto de fibra de carbono. El procedimiento es el mismo. En las dos tablas siguientes se recogen los resultados para cada vía de gestión de las dos etapas más a tener en cuenta: los resultados obtenidos tanto en la etapa de desecho como en la de reaprovechamiento.

En la tabla 31, se aprecia que los resultados obtenidos en la etapa de desecho son iguales a los obtenidos para la pala de fibra de vidrio. Esto es debido a que el tipo de material del que está fabricada el aspa no tiene influencia en los valores de energía y de huella de carbono para la etapa de desecho.

Estrategia de gestión:	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Reutilización	1,2	0,08
Reciclado bajo	3	0,2
Incineración	3	0,2
Vertederos	1,2	0,08
Re-fabricación	1,2	0,08

Tabla 31: Tabla resumen de la etapa de desecho para cada vía de gestión. Fuente: (8).

En la tabla 32, se reúnen los resultados obtenidos en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión:

Estrategia de gestión:	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Reutilización	-2.860	-208
Reciclado bajo	-0,6	-0,04
Incineración	-48,1	16,1
Vertederos	0	0
Re-fabricación	-2.840	-206

Tabla 32: Tabla resumen de capacidad reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

Al igual que ocurría para el caso de la pala de fibra de vidrio, la reutilización resulta ser el tipo de gestión más beneficiosa tanto energética como medioambientalmente. En segundo lugar, la re-fabricación es una opción de prestaciones similares. En tercer y en cuarto lugar se sitúan la incineración (a nivel energético. En cuanto a impacto es la peor opción) y el reciclado bajo, respectivamente. Por último, la opción más desfavorable es la deposición en vertederos. En la ilustración 33, se puede apreciar gráficamente:

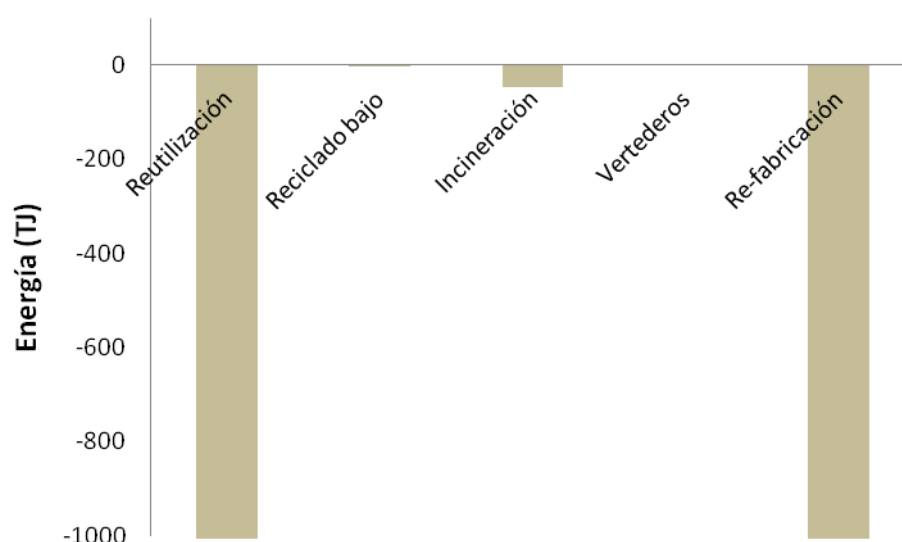


Ilustración 33: Consumo energético en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

Los valores de consumo energético son más elevados en la pala de fibra de carbono que en la fibra de vidrio debido a que como se indicó el contenido en energía en la producción primario de la fibra de carbono es mayor como se indicó anteriormente en la ilustración 17, el contenido en energía para la producción primaria es mayor.

Y en cuanto al impacto ambiental (ilustración 34), el orden es similar salvo en la incineración que resulta ser el tipo de gestión que emite mayor contaminación ya que presenta huella de carbono positiva. La deposición en vertederos tiene huella de carbono neutra porque no presente una etapa de reaprovechamiento, no porque no pueda contaminar una vez esté depositada la pala en el vertedero.

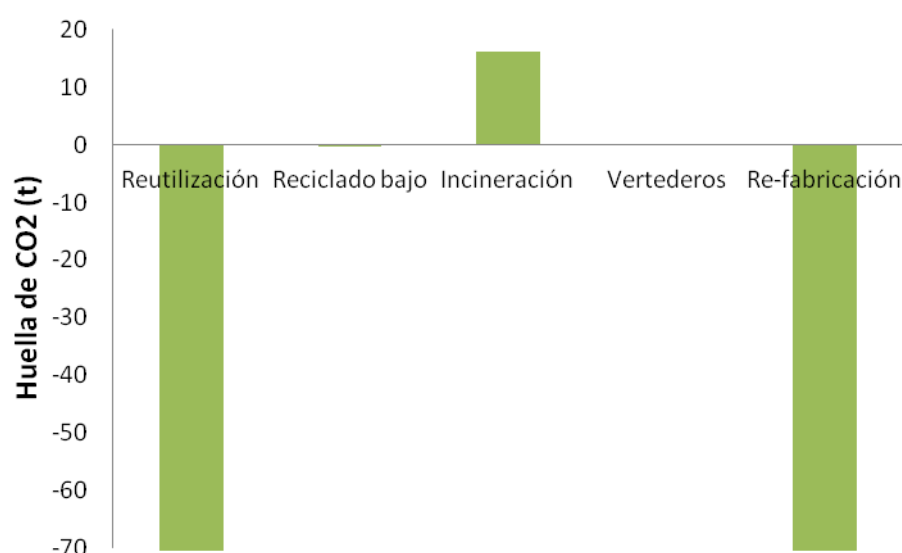


Ilustración 34: Huella de carbono en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

Por otra parte, cabe mencionar que los valores de huella de carbono en la pala de fibra de carbono son más elevados que en la fibra de vidrio debido a que la huella de CO₂ para la producción primaria de la fibra de carbono es mayor, como se puede apreciar en la ilustración 35:

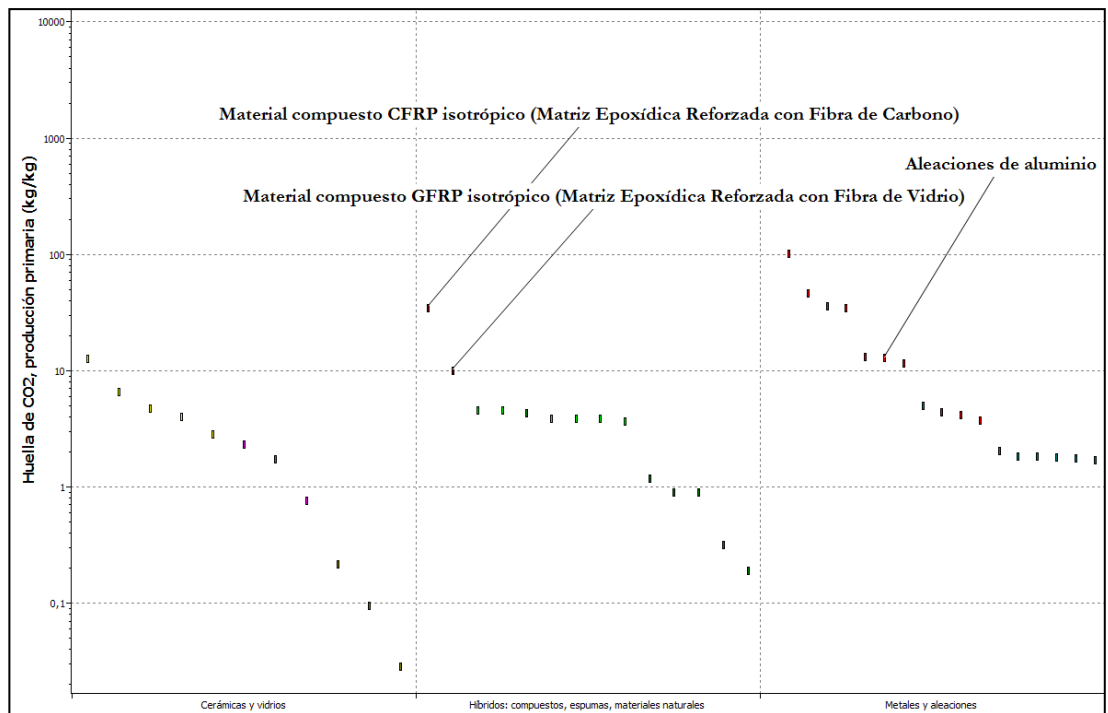


Ilustración 35: Huella de carbono para la producción primaria. Fuente: (9).

El orden de preferencia por capacidad de reaprovechamiento para la pala de fibra de carbono según la vía de gestión es el mismo:

Reutilización > Re-fabricación > Reciclado bajo > Incineración > Deposición en vertederos.

5.2.2- Cálculos para una pala de aluminio: resumen de resultados obtenidos.

Nuevamente, siguiendo la metodología empleada para los cálculos de la pala de fibra de vidrio, se procede en este caso a hacer los cálculos para la pala considerando que es de aluminio. El procedimiento es el mismo. En las siguientes tablas se recogen los datos más relevantes para su comparativa:

Estrategia de gestión:	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Reutilización	1,2	0,08
Reciclado	4,2	0,29
Reciclado bajo	3	0,2
Vertederos	1,2	0,08
Re-fabricación	1,2	0,08

Tabla 33: Resumen de la etapa de desecho para cada vía de gestión. Fuente: (8).

En la tabla 33 se aprecia que el tipo de material del que esté compuesta el aspa no incide en los valores de consumo energético ni en los de huella de carbono en la fase de desecho, ya que según el tipo de estrategia de gestión, son los mismos valores que para los casos anteriores.

Se observa que el reciclado es la estrategia de gestión que conlleva mayor consumo energético e impacto, por tanto, es la vía de gestión que supone mayor coste de preparación.

En la tabla 34, se reúnen los resultados obtenidos en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión:

Estrategia de gestión:	Energía (TJ)	Huella de CO ₂ (t)
Reutilización	-1.260	-78,8
Reciclado	-1.050	-62,1
Reciclado bajo	0	0
Vertederos	0	0
Re-fabricación	-1.240	-77,5

Tabla 34: Resumen de la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

En cuanto al consumo energético, la reutilización es el tipo de gestión más beneficiosa y menor impacto presenta. Después, se encuentra la re-fabricación, con un rendimiento muy similar. En tercer lugar, el reciclado del la pala de aluminio es también un tipo de gestión con grandes beneficios tanto energéticos como ambientales. Es un proceso que se realiza desde hace tiempo porque, además de los beneficios ambientales, tiene interés económico. Desde el punto de vista técnico resulta fácil y supone un gran ahorro de energía y materias primas. El aluminio que se recupera conserva gran parte de sus propiedades, pudiendo repetir el proceso cuantas veces se quiera.

- Al utilizar aluminio reciclado se ahorra un 95% de la energía empleada a partir de la producción del mineral primario.
- Puede reciclarse indefinidamente sin perder sus propiedades, pudiéndose fabricar un producto con idénticas propiedades.
- Se puede reciclar el 100% de los materiales recuperados.
- Su recuperación es rentable técnica y económicamente.

Después, el reciclado bajo es una estrategia de gestión que no produce beneficios energéticos en las palas de aluminio. Y, por último, la opción del vertedero que siempre es la última elección. En el vertedero ocupa espacio, no se degrada y es irrecuperable. En la ilustración 36 se puede ver gráficamente el consumo energético según la vía de gestión empleada:

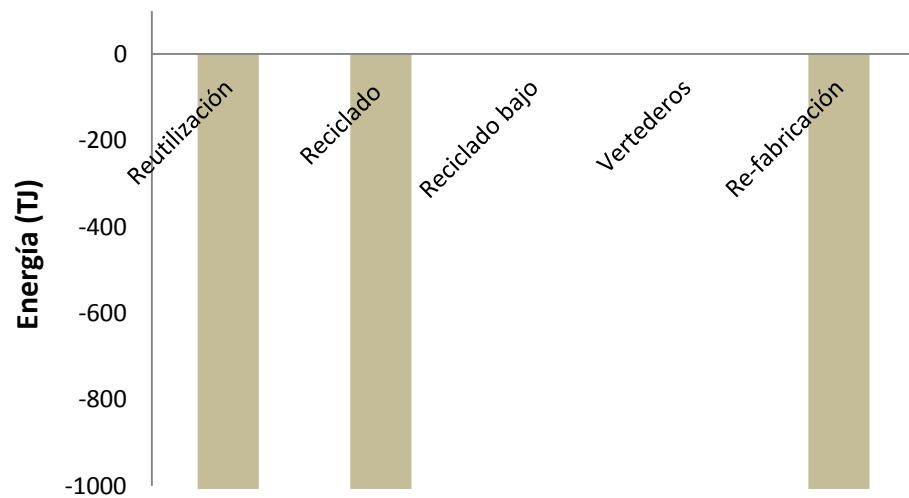


Ilustración 36: Consumo energético en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

En cuanto al nivel de impacto ambiental tanto la reutilización, la re-fabricación como el reciclado respectivamente, son estrategias que resultan beneficiosas desde este punto de vista ya que presentan huella de carbono negativa. Por otra parte, tanto en el reciclado bajo como en la deposición en vertederos tienen la huella de carbono neutra. En la ilustración 37 se puede apreciar gráficamente:

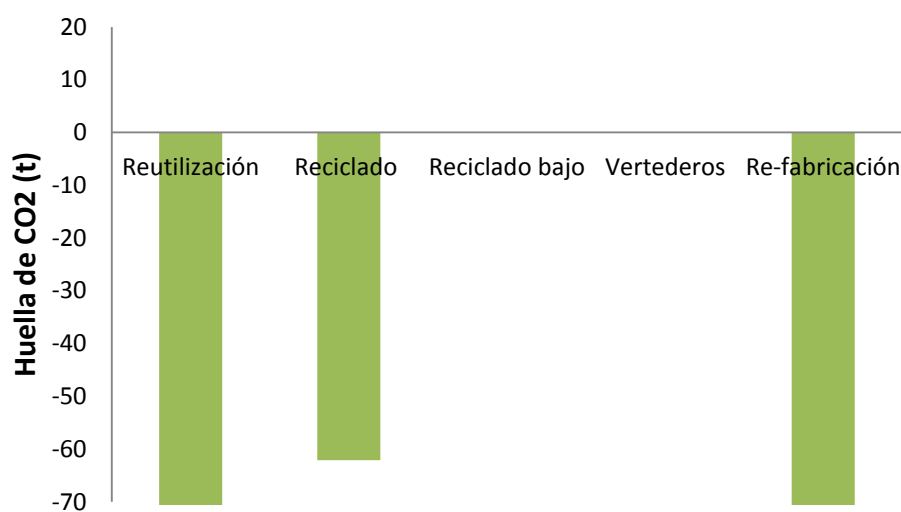


Ilustración 37: Huella de carbono en la etapa de reaprovechamiento para cada vía de gestión. Fuente: (8).

Expuestos los resultados, el orden de preferencia para adecuada la gestión de una pala de aluminio es el siguiente:

Reutilización > Re-fabricación > Reciclado > Reciclado bajo \approx Deposición en vertederos.

5.3.- Descripción del proceso de estrategia de gestión elegido.

Una vez analizados los resultados obtenidos según el tipo de material del que esté compuesto la pala y según el tipo de gestión, se va a proceder a la descripción de un proceso de gestión adecuado para las aspas de fibra de vidrio.

Tanto para las palas de fibra de carbono como para las de aluminio no se va a describir su proceso ya que el fin de este TFC era fundamentalmente el de centrarse en la valorización de las palas de fibra de vidrio que son el material de fabricación más ampliamente utilizado, y el de estudiar entre las distintas estrategias de gestión cual obtenía mejores resultados para describir su proceso y poner solución al problema emergente mundial de saber cómo gestionar los grandes volúmenes de residuos de dicho material que están generando las aspas que están llegando al final de su vida útil.

Aunque no se va a describir, por tanto, procesos de gestión para las aspas de fibra de carbono ni para las de aluminio, cabe reseñar que con las aspas de fibra de carbono la dificultad de reciclar es la misma que la encontrada en las aspas de fibra de vidrio, es decir, la dificultad para separar las fibras de la resina al ser éstas últimas de tipo termoestable lo cual significa que tienen una estructura entrecruzada difícil de revertir. La fibra de carbono es un material con mayores prestaciones, pero la fibra de vidrio por su calidad-precio hace que sea un material mucho más demandado. El material compuesto de fibra de carbono suele valer en torno a 29,5 €/Kg, respecto del de fibra de vidrio que tiene un coste de 21 €/Kg.

Por otra parte, las aspas de aluminio además de ser menos empleadas, al llegar al final de su vida útil no presentan ninguna dificultad especial para su gestión ya que basta con realizar una etapa de corte y después no presentan ninguna dificultad en su proceso de reciclado. El reciclaje no daña la estructura del metal, y el aluminio puede ser reciclado indefinidamente y ser usado para producir cualquier producto que hubiera necesitado

aluminio nuevo. Además es económico. Tiene un coste medio de 1,66 €/Kg. El reciclaje del aluminio es un proceso mediante el cual, los desechos de aluminio pueden ser convertidos en otros productos tras su utilidad primaria. Este proceso implica simplemente refundir el metal, lo cual es mucho más barato y consume mucha menos energía que la producción de aluminio a partir de la electrólisis de la alúmina (Al_2O_3).

5.3.1.- Descripción del proceso de gestión elegido para valorización de palas de GFRP (fibra de vidrio).

Para una eficiente gestión de residuos de palas de fibra de vidrio, se propone la descripción de un proceso de gestión consistente en un etapas de corte y un posterior tipo de reciclado por el cual sea posible valorizar eficientemente el material sin perder apenas sus propiedades, para así poder reutilizar las fibras de vidrios que se consigan separar de la resina. Así que el proceso de gestión propuesto no es exactamente una reutilización en el sentido de volver a usar la pala tal como está para otro uso, sino más bien el realizar un proceso que consiga reciclar la fibra de vidrio para poder entonces reutilizarla, o en su defecto, conseguir un reciclado bajo mediante el que poder convertir los materiales de desecho de la pala en nuevos materiales o productos de menor calidad y funcionalidad reducida. El proceso se podría dividir varias etapas:

Una primera etapa en la que pala en cuestión será retirada del aerogenerador mediante grúas y demás equipos necesarios para ellos. Una vez retirada, con la maquinaria de corte adecuada para ello, es decir, una sierra que sea capaz de fragmentar dicho la fibra de vidrio de forma adecuada, se procede a realizarle un proceso de corte en dicho lugar de retirada para reducir su tamaño desde unos 50 metros a láminas de aproximadamente 1 metro, para así facilitar posteriormente su transporte a la correspondiente planta de valorización, ya que de lo contrario transportar por carretera una pala de 50 metros además de ser laborioso podría ser peligroso. En la ilustración 38, puede apreciarse la imagen de una pala y unas líneas verticales que indican los cortes necesarios. Las láminas de 1 metro de GFRP podrán ahora sí almacenarse perfectamente en un contenedor

metálico dentro de un camión que pueda soportar la carga del residuo, para así poder ser transportado a la planta donde se procederá a la siguiente etapa.

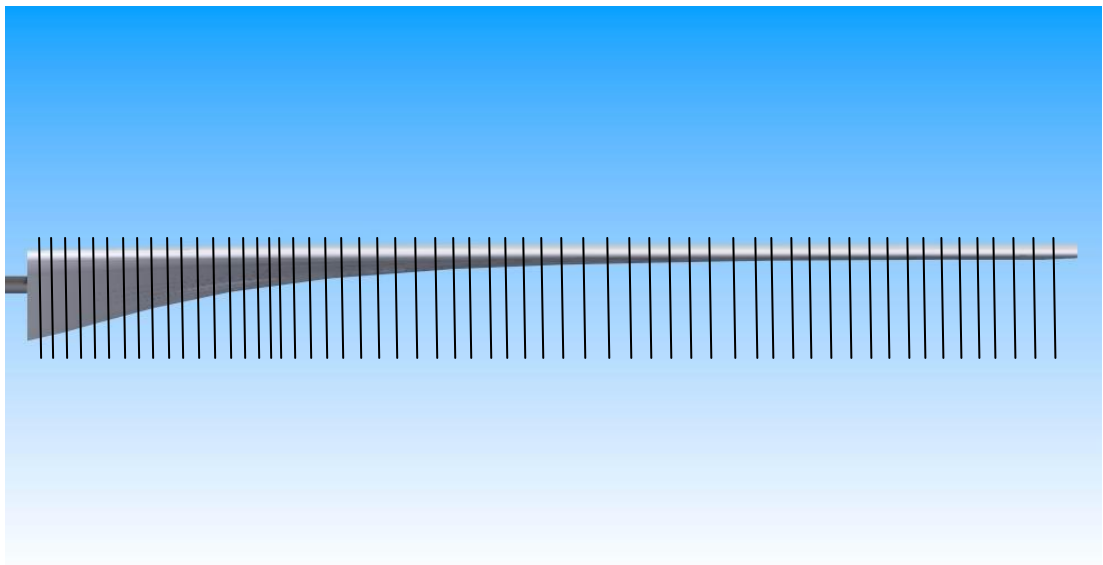


Ilustración 38: Pala de aerogenerador en la cual se indican las trayectorias de cortes necesarios para reducir a láminas de 1 metro de longitud. Fuente: (28).

La maquinaria de corte manual empleada para el primer corte necesitará ser móvil para poder trabajar en el lugar de origen del residuo, y que cuente con la mayor velocidad de corte y con el menor coste posible del mercado. En la tabla 31 se muestran unos requisitos que ha de cumplir:

Requisitos de la maquinaria de corte:
Materiales a cortar: capacidad para cortar el aspa de fibra de vidrio reforzado con resina epoxi.
Dimensiones de la máquina de corte: tiene que poder tener las dimensiones necesarias para cortar una pala de 50 metros de longitud.
Velocidad de corte: 1,50 metros/segundo.
Capacidad de corte: ≥ 5 metros.
Móvil: que tenga ruedas para poder trabajar donde sea necesario.
Económica: la más barata del mercado que cumpla su finalidad.

Tabla 30: Requisitos de maquinaria de corte. Fuente: Eastman.com

Cortar la fibra de vidrio no es difícil, pero lleva tiempo para garantizar la seguridad y precisión requerida. Hay diversidad de maquinaria para ello: con un acanalador, una sierra para metales de hoja fina, una sierra cilíndrica grande o sierras de agua, entre otras. En la ilustración 39, se puede apreciar dos modelos de maquinaria similares a los que podrían servir para la etapa de corte.



Ilustración 39: Modelo de sierras de corte de fibra de vidrio. Fuente: (13)

Una vez se tiene el residuo fragmentado en láminas de 1 metro, para poder separar la fibra de vidrio de la resina y reciclarla, hay 3 formas posibles: reciclado mecánico, reciclado térmico o reciclado químico:

1. El **reciclado mecánico** consiste en el empleo de trituradoras y maquinaria de clasificación para obtener compuestos triturados y separados.

El reciclado mecánico consiste en que llegado el residuo a la planta de gestión a tratar procedente del lugar de retirada y corte inicial, el siguiente paso consistirá en practicarle una operación de trituración fina con maquinaria de molinos de martillos (ilustración 40) para poder reduciendo sucesivamente el tamaño de las láminas de 1 metro hasta tamaños de hasta 50 micras.

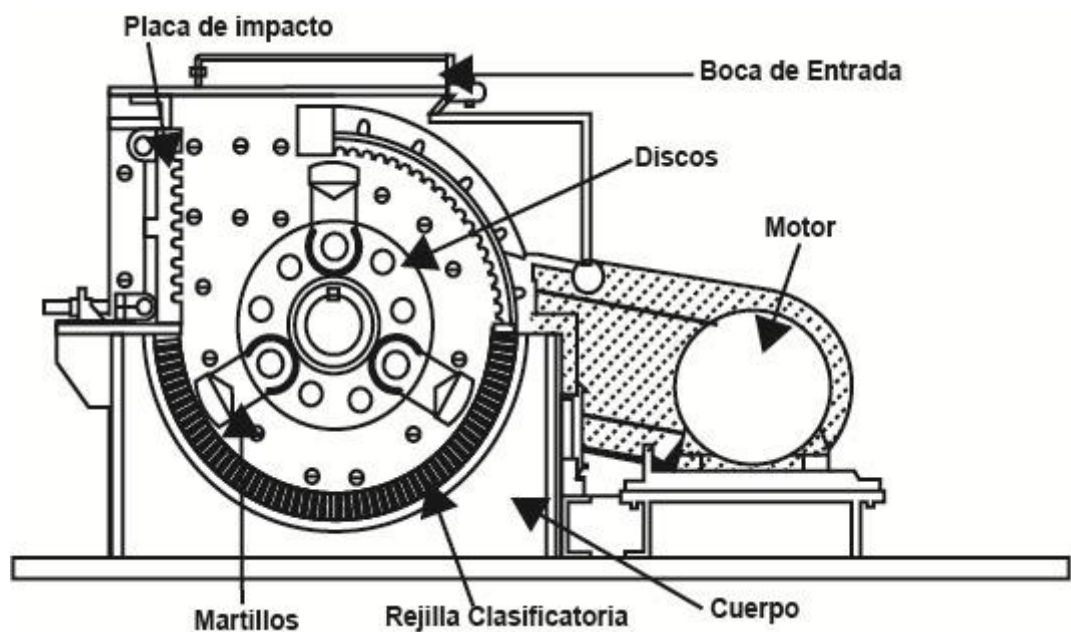


Ilustración 40: Molino de martillos. Fuente: (35).

Después de la trituración habría que comprobar si el tamaño de las partículas es homogéneo para que si no lo fuera, habría que realizar un proceso de clasificación de partículas en función de su tamaño. Este tratamiento podría realizarse con un tamizado, el cual consiste pues en realizar separaciones de partículas sólidas de acuerdo a su tamaño (ilustración 41). Prácticamente es utilizar coladores de diferentes tamaños en los orificios, colocados en forma consecutiva, en orden decreciente, de acuerdo al tamaño de los orificios. Es decir, los de orificios más grandes se encuentran en la parte superior y los más pequeños en la inferior. Los coladores reciben el nombre de tamiz y están elaborados en telas metálicas.

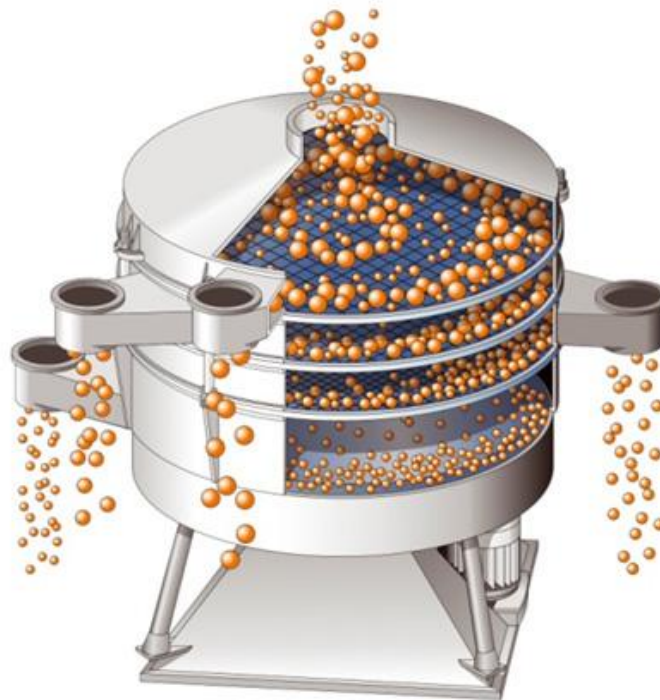


Ilustración 41: Maquinaria de tamizado. Fuente: (22)

Una vez clasificadas las partículas, se inspeccionan y se seleccionan aquellas con mejores propiedades, las cuales suelen ser la de menor tamaño al ser las que mejor se han desprendido de las resinas de la fibra de vidrio, que serán las que tengan una salida productiva.

2. El **reciclado térmico** es un proceso que permite la recuperación de la fibra de vidrio en cierta medida, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

La pirolisis (ilustración 42) es uno de los procesos de reciclado térmico más utilizados. Para el caso del aspa a valorizar, se introducirían las láminas seccionadas en un horno eléctrico en un rango de temperatura de procesamiento de entre los 400-700° C, en el que será posible descomponer la matriz termoestable del polímero (resina) para la recuperación de aquellas fibras de vidrio desprendidas que conserven propiedades aptas para una nueva salida productiva.

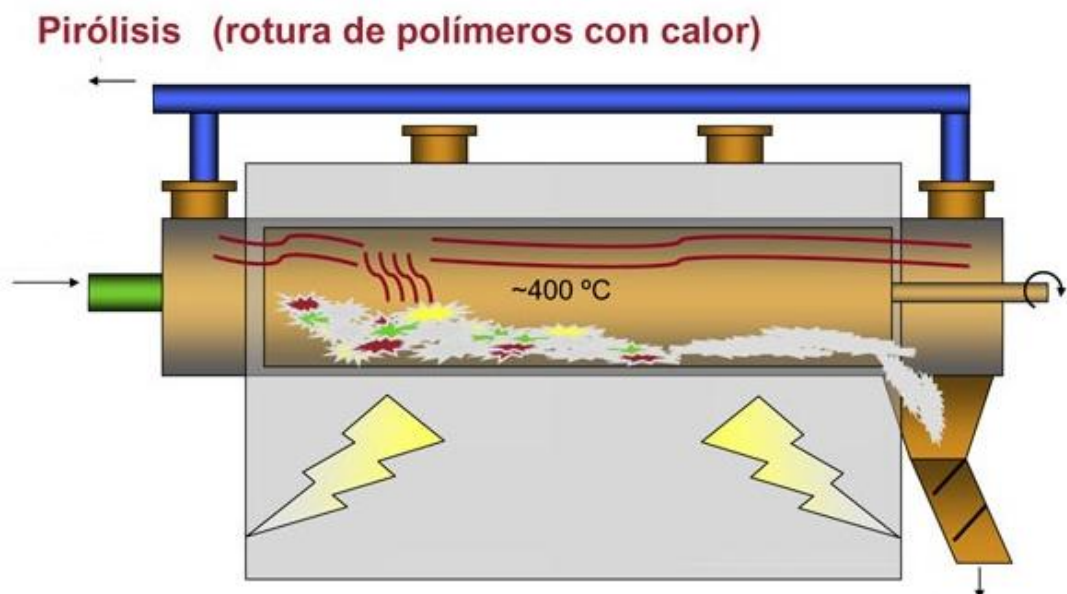


Ilustración 42: Reciclado térmico
http://www.terra.org/sites/default/files/bd_imagenes/0011013.jpg

(Pirolisis).

Fuente:

3. El **reciclado químico** se puede llevar por medio de degradación química mediante el uso de disolventes. En este caso, para poder separar completamente la fibra de vidrio de la resina se llevará a cabo un proceso de reciclado químico que implicará el uso de disolventes a condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente ($P=1\text{atm}$; $T=25^{\circ}\text{C}$) sobre el material compuesto de resina epoxi reforzado con fibra de vidrio.

El objetivo es conseguir mediante el uso de un disolvente como el ácido nítrico, degradar lo suficiente (sin dañar significativamente las propiedades de las fibras de vidrio que se valoricen), la matriz termoestable para poder recuperar las fibras de vidrio que conserven propiedades aptas para una nueva salida productiva. En las condiciones apropiadas, con la acción del disolvente la matriz epoxi se descompondrá rápidamente y se podrán recuperar partículas de fibras de vidrio con la mayor parte de sus propiedades iniciales ilesas.

El disolvente químico empleado deberá ser capaz de romper los fuertes enlaces de reticulación de la resina termoendurecible. En algunos casos, el compuesto orgánico producido a partir de la disolución del polímero puede ser uno usado para la formulación de nuevas resinas.

Cualquiera de estas 3 técnicas permite la separación (reciclado) de la resina para poder dar una nueva salida productiva a la fibra de vidrio recuperada. Entre las nuevas salidas productivas se encuentran la adición en proporciones adecuadas en la fabricación de nuevos materiales compuestos, tales que la calidad del nuevo producto sea adecuada.

En la ilustración 43 se puede apreciar el aspecto de la fibra de vidrio recuperada en función del tipo de reciclado empleado:

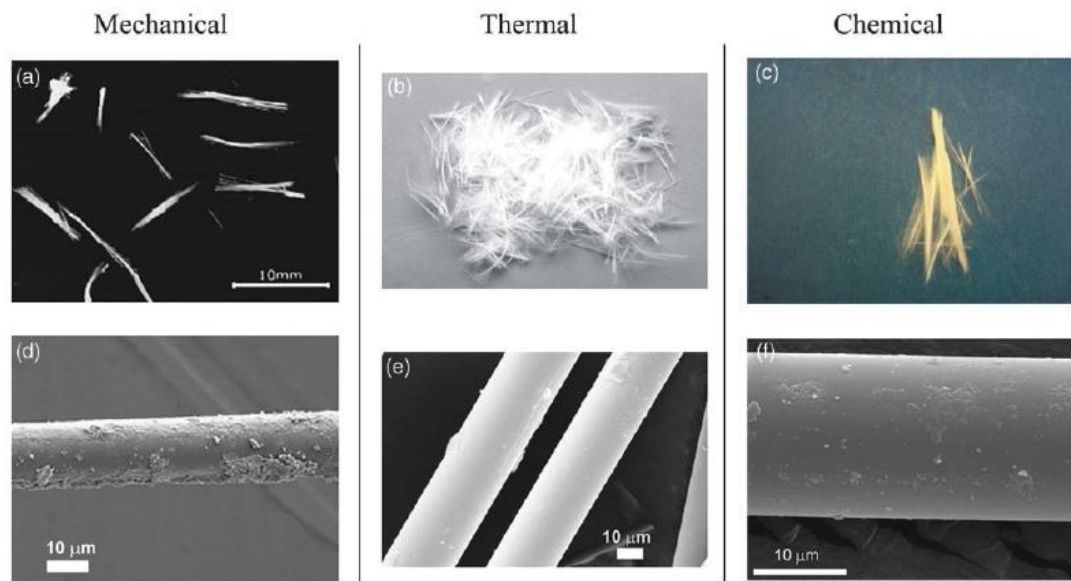


Ilustración 43: Imágenes del aspecto de la fibra de vidrio reciclada (de izq. a derecha): tanto si es por medio de un reciclado mecánico, como si es por reciclado térmico o si es por reciclado químico. Fuente: (5).

La elección por uno u otro vendrá dado por aquel proceso que resulte menos contaminante y que recupere la fibra de vidrio con mejores propiedades y en este sentido es el **reciclado químico con el uso disolventes al ser más preciso** en su modo de actuar sobre la matriz polimérica que los otros dos métodos en los que quedaban más dañado o degradado el material, ya que en el caso del reciclado mecánico era por medio de constantes y agresivas trituraciones y en el del reciclado térmico las condiciones de temperaturas tan elevadas.

El trabajar con residuos de fibra de vidrio es peligroso en este tipo de procesos como los anteriormente descritos en los cuales se pueden desprender partículas tóxicas de polvo de fibra de vidrio. Las disposiciones relativas a la evaluación de riesgos de la Ley 31/1995, de Prevención de Riesgos Laborales, y del Real Decreto 39/1997, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, implican la utilización de valores límite de exposición para poder valorar el riesgo por exposición a agentes químicos, cuando ésta se determine de forma cuantitativa, es decir, por medio de las concentraciones en el aire del puesto de trabajo.

El valor límite (VLA-ED) a la fibra de vidrio es de 1 fibra/cm³. Los operarios han de protegerse con equipos de protección personales y el lugar de operación debe adecuarse a la normativa vigente de seguridad e higiene.

6. CONCLUSIONES.

Calculados y discutidos los resultados obtenidos en este TFC para determinar qué estrategia de gestión era posible aplicar para valorizar de la forma más eficientemente posible los residuos generados de aspas de aerogeneradores de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio, considerando que la vía de gestión más óptima es aquella que genera más energía y a su vez menor impacto ambiental, ya que lo que se siempre se intenta es que el impacto al medio ambiente sea el mínimo posible y economizar al máximo los recursos naturales: en ese sentido según los cálculos obtenidos, la reutilización resulta ser en teoría la opción más atractiva, seguida de la re-fabricación, el reciclado bajo, la incineración y la deposición en vertederos, respectivamente.

Aunque se demostró que tanto la reutilización como la re-fabricación fueron las vías de gestión que obtuvieron mejores resultados teóricos no son procesos de gestión que tengan mucho que describir, por lo que el proceso que se desarrolló fue el de reciclado (o reciclado bajo, en su defecto, que es un reciclado de menor funcionalidad) que obtuvo en los cálculos tanto un consumo energético como una huella de CO₂, mediante el cual se pretendió de que fuera posible extraer valorización por medio de la separación de la fibra de vidrio de la resina termoestable a la que estaba unida, para conseguir darle una nueva salida productiva al volumen de fibra de vidrio reciclada. Se concluyó que el reciclado químico es el más eficaz, en lo que a tipos de reciclado se refiere.

Con la opción de la incineración se recuperaba algo de energía, pero con una eficiencia baja, económicamente costosa por las instalaciones necesarias y medioambientalmente perjudiciales por presentar huella de carbono positiva.

Por último, la deposición en vertederos que es siempre la opción a evitar en cualquier caso, y en concreto en este, en el que el fin principal de este TFC era el de estudiar alternativas de gestión a los vertederos.

7. ANEXOS.

7.1.- Proceso de fabricación y montaje de palas Gamesa.

FABRICACIÓN:

1. *Fabricación de la viga.* Tomando como base materiales compuestos por fibra de vidrio y fibra de carbono, pre impregnados con resina epoxi, se cortan distintas telas que se colocan en un molde y posteriormente se someten a un proceso de curado (imagen 1).

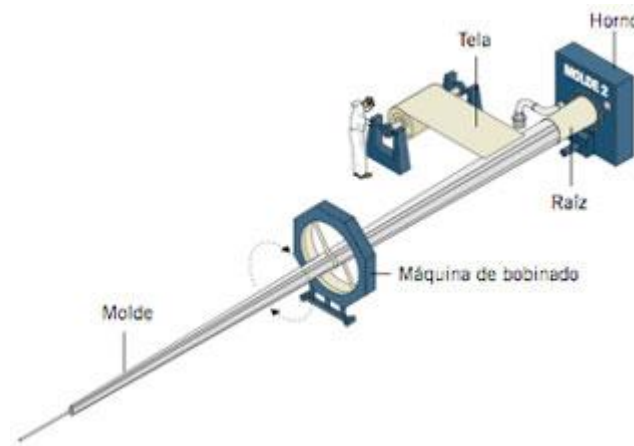


Imagen 1.- Fabricación de la viga. Fuente: (17).

2. *Fabricación de las conchas.* Tras aplicar una capa de pintura que servirá como protección de la pala, la fibra de vidrio es utilizada para la fabricación de las conchas, siguiendo el mismo proceso de fabricación que la viga (imagen 2).

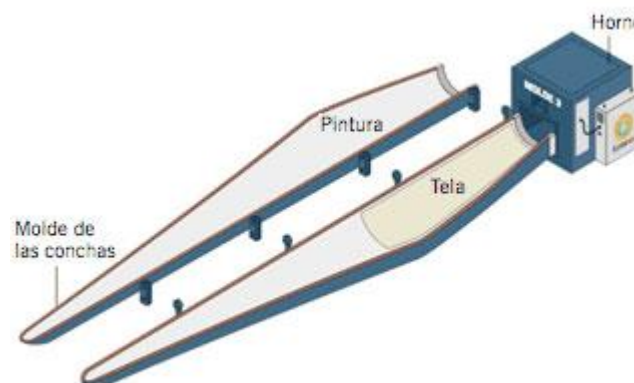


Imagen 2.- Fabricación de las conchas. Fuente: (17).

3. *Ensamblaje*. Una vez obtenidas las dos conchas, se procede al ensamblaje y pegado de la viga entre las dos conchas (imagen 3).

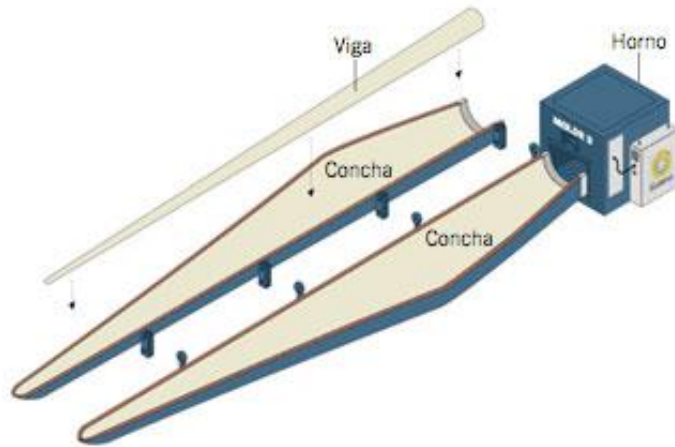


Imagen 3.- Ensamblaje. Fuente: (17).

4. *Curado*. El conjunto ensamblado pasa nuevamente por el horno hasta formar una unidad compacta (imagen 4).

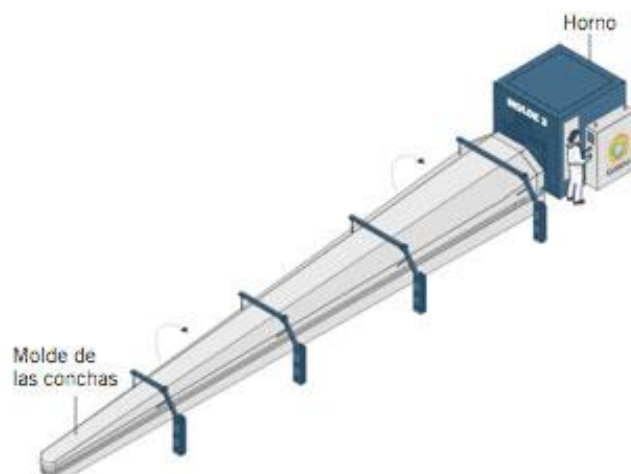


Imagen 4.- Curado. Fuente: (17).

5. *Desbarbado y pulido*. Desmoldado el conjunto que constituye la pala, se pasa a la zona de acabado, donde se terminarán los bordes de ataque y salida de la pala, y se realizará una última revisión de ésta (imagen 5).

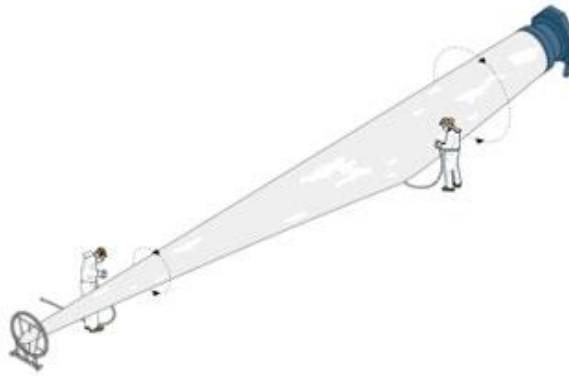


Imagen 5.- Desbarbado y pulido. Fuente: (17).

MÓNTAJE:

Gamesa utiliza medios de transporte especializados para trasladar sus aerogeneradores al parque eólico de destino. Estos medios facilitan el acceso a cualquier terreno, incluso a los más complejos, con el menor impacto ambiental. Una vez en destino, un experimentado equipo humano realiza el montaje de las turbinas. Finalmente, Gamesa lleva a cabo la fase de puesta en marcha y realiza la operación y mantenimiento a lo largo de la vida operativa de los aerogeneradores.

Obra civil y cimentación:

Previo al transporte y el montaje del aerogenerador, se realizan tareas de adecuación del terreno, tales como el hormigonado y la construcción de la plataforma de montaje, la cual requiere una compactación adecuada para soportar pesos de unos $4\text{kg}/\text{cm}^2$. Obra civil y cimentación.

1. *Montaje de la torre.* Los tramos de torre se colocan uno encima de otro mediante grúas de celosía. Éstas pueden ser de oruga o de gatos hidráulicos. Las de oruga, con anchos entre 8,5 y 10 m., pueden cambiar de posición fácilmente. Las de gatos, con 5 m. de ancho, son aptas para trabajar en terrenos difíciles por su estrechez.



Imagen 6.- Montaje de la torre. Fuente: (17).

Una vez colocados los tramos, el personal de campo une y ensambla las piezas. La ubicación y la altura del aerogenerador son estudiadas previamente para garantizar el máximo aprovechamiento del viento.

2. *Montaje de la nacelle.* Una vez montada la torre se procede a la instalación de la nacelle, la cual se acopla al último tramo de la torre.

En paralelo al montaje del aerogenerador se procede a la conexión eléctrica de todos los componentes.

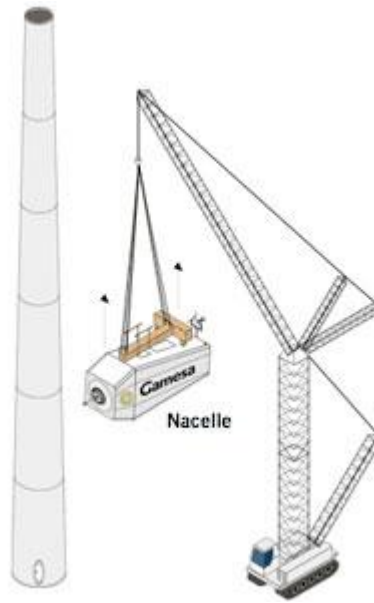


Imagen 7.- Montaje de la nacelle. Fuente: (17).

3. *Montaje del rotor.* El montaje puede realizarse en tierra, acoplando las tres palas al buje, o bien pala a pala. Este último método requiere menor espacio de maniobra y permite que el montaje se haga con más rapidez.

Una vez que la nacelle está instalada, se suben el buje y el cono y después se elevan las palas, horizontalmente, una a una.

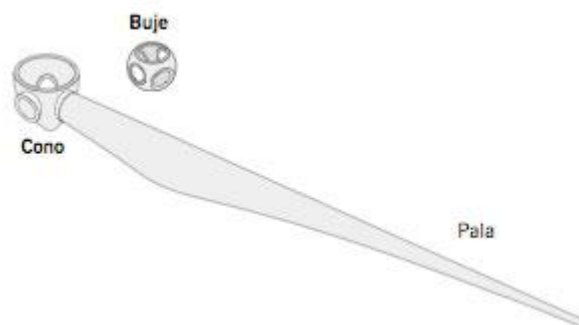


Imagen 8.- Montaje del rotor. Fuente: (17).

7.2.- Descripción de material compuesto GFRP isotrópico (Matriz Epoxídica Reforzada con Fibra de Vidrio).

Material:

Los materiales compuestos o composites son uno de los desarrollos en materiales más importantes del siglo XX. Aquellos con mayor rigidez y resistencia se fabrican con fibras continuas (vidrio, carbono o aramida como el kevlar) incrustados en una resina termoestable (poliéster o epoxi). Las fibras son responsables de la rigidez y resistencia actuando la matriz como distribuidor de esfuerzos, y proporcionando ductilidad y tenacidad, así como protección a las fibras de los daños causados por la manipulación o el medio ambiente. Es el material de la matriz, quien limita la temperatura de servicio y las condiciones de procesamiento. Los composites de vidrio y poliéster (GFRPs) son los más baratos y con mucho, los más utilizados. Una innovación reciente es el uso de termoplásticos como material para la matriz, ya con un co-tejido de polipropileno barato y fibra de vidrio para por termoformado, derretir el PP, o para alta temperatura con resinas termoplásticas caras, como el PEEK que permiten a los composites mayor temperatura de trabajo y resistencia al impacto. El GFRP de alto rendimiento utiliza fibras continuas. Los composites con fibras de vidrio cortadas son más baratos y se utilizan en cantidades mucho más grandes. Los productos de GFRP van desde pequeñas placas de circuitos electrónicos, a cascos de barcos grandes, la carrocería y paneles interiores de automóviles, electrodomésticos, muebles y accesorios.

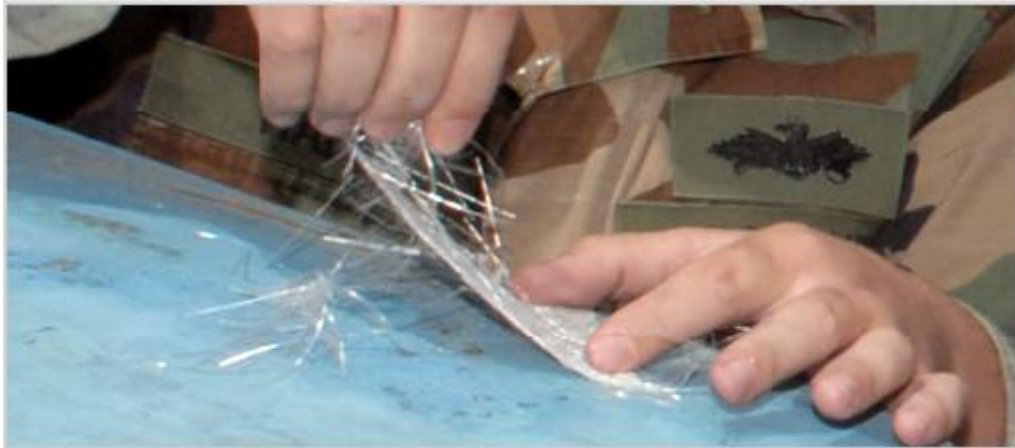


Imagen 9.- Un operador de equipos muestra las técnicas de reparación de fibra de vidrio, haciendo una reparación de daños a un pequeño barco. Fuente: (9).

Composición (resumen):

Epoxi + refuerzo con fibra de vidrio E continua (0, +-45, 90), disposición quasi-isotrópica.

Propiedades generales:

Densidad	1,75e3	-	1,97e3	kg/m ³
Precio	* 18,2	-	25,8	EUR/kg
Fecha de primer uso ("-" significa AC)	1935			

Propiedades mecánicas:

Modulo de Young	* 15	-	28	GPa
Modulo a cortante	* 6	-	11	GPa
Módulo en volumen	18	-	20	GPa
Coeficiente de Poisson	* 0,314	-	0,315	
Límite elástico	* 110	-	192	MPa
Resistencia a tracción	* 138	-	241	MPa
Resistencia a compresión	* 138	-	207	MPa
Elongación strain	* 0,85	-	0,95	%

Dureza-Vickers	* 10,8	-	21,5	HV
Resistencia a fatiga para 10^7 ciclos	* 55	-	96	MPa
Tenacidad a fractura	* 7	-	23	
				MPa.m ^{0.5}
Coeficiente de pérdida mecánica (tan delta)	* 0,0028	-	0,005	

Propiedades térmicas:

Temperatura de vitrificación	147	-	197	°C
Máxima temperatura en servicio	* 140	-	220	°C
Mínima temperatura en servicio	* -123	-	-73,2	°C
¿Conductor térmico o aislante?				Mal aislante
Conductividad térmica	* 0,4	-	0,55	
				W/m.°C
Calor específico	* 1e3	-	1,2e3	J/kg.°C
Coeficiente de expansión térmica	* 8,64	-	33	
				μstrain/°C

Propiedades eléctricas:

¿Conductor eléctrico o aislante?				Buen aislante
Resistividad eléctrica	* 2,4e21	-	1,91e22	
				μohm.cm
Constante dieléctrica (permisividad relativa)	* 4,86	-	5,17	
Factor de disipación (tangente de pérdida dieléctrica)	0,004	-	0,009	
Rígidez dieléctrica (colapso dieléctrico)	* 11,8	-	19,7	
				1000000 V/m

Propiedades ópticas:

Transparencia

Translucido

Procesabilidad:

Moldeabilidad

4 - 5

Mecanizabilidad

2 - 3

Ecopropiedades:

Contenido en energía, producción primaria

* 150 - 170 MJ/kg

Huella de CO₂, producción primaria

* 9,5 - 10,5 kg/kg

Reciclaje

A priori, no.

INFORMACIÓN DE APOYO:

Líneas de diseño.

Los composites de matriz polimérica pueden conformarse por métodos en molde cerrado o abierto. Todos los métodos de producción en molde cerrado orientan las fibras paralelamente a la superficie del molde (incluso por extrusión, donde las fibras se orientan paralelamente a la superficie interior del orificio de la matriz). En los métodos con molde abierto, todos permiten la orientación multidireccional de fibra no paralela al molde o mandril, con excepción de la pultrusión, donde las fibras están orientadas en paralelo a la superficie del laminado y las placas del molde, y el calandrado, donde son paralelas a la superficie de la chapa. Los métodos de deposición permiten el control completo de la orientación de las fibras, son utilizados en grandes productos únicos, que no requieren una alta proporción de fibra respecto a la resina. Por laminación y calandrado se obtienen láminas. La pultrusión se utiliza para hacer formas continuas de sección transversal constante. Por su parte, el devanado de filamentos produce grandes objetos huecos tales como tubos, bidones u otros recipientes. Las uniones de los materiales compuestos de fibra larga son fuente de debilidad, porque las fibras no se

unen en la articulación. Dos o más láminas suelen estar unidas con pegamento, para garantizar la vinculación adecuada en la unión. Se requiere una superposición de 25 mm de longitud en solapes simples y dobles, o 40-50 mm son necesarios para uniones de bandolera, salto y bufanda. Los agujeros en los laminados reducen drásticamente la resistencia, por lo que las uniones con pasadores son difíciles. La fabricación de composites es intensiva en mano de obra. Es difícil predecir la resistencia final y el modo de fallo, porque los defectos son fáciles de crear y difíciles de detectar o reparar.

Aspectos técnicos.

Las propiedades de los materiales compuestos de fibra larga están fuertemente influidas por la elección de la fibra, de la matriz y la forma en que se combinan los siguientes parámetros: relación resina / fibra, longitud de la fibra, orientación de las fibras, grosor del laminado y presencia de agentes de acoplamiento entre fibra y resina. El vidrio ofrece alta resistencia a bajo coste. El carbono tiene muy alta resistencia, rigidez y baja densidad. El Kevlar aporta alta resistencia y baja densidad, es ignífugo y transparente para las ondas de radio (a diferencia del carbono). Las matrices más ampliamente utilizadas son las de poliéster, ya que ofrecen propiedades razonables a un costo relativamente bajo. Las resinas epoxi tienen propiedades superiores, y el rendimiento en temperatura de las poliimidas puede justificar su uso en determinadas aplicaciones, pero son caras. La resistencia de un composite se incrementa al aumentar la proporción de fibra sobre la de resina. La orientación de las fibras paralelas a la dirección de carga mejora su resistencia en esa dirección. Cuanto más larga sea la fibra, más eficaz es el refuerzo en la repartición de las cargas aplicadas, pero las fibras más cortas son más fáciles de procesar y por lo tanto, más baratas. El aumento del espesor del laminado conduce a la reducción de la resistencia y del módulo de rigidez ya que existe una mayor probabilidad de encontrar burbujas atrapadas. Los agentes de acoplamiento en general, aumentan la resistencia a la tracción. Las condiciones ambientales afectan el rendimiento de los composites: la carga en fatiga, la humedad y el calor son variables que reducen la carga máxima aplicable.

Usos típicos.

Además de en la fabricación de palas de aerogeneradores en equipamiento deportivo como esquís, raquetas, palos de golf y tablas de patinaje sobre hielo o de surf; cascos de barcos, botes y lanchas; carrocerías, componentes de automoción, cerramientos y elementos auxiliares en construcción, plantas químicas.

8. BIBLIOGRAFÍA.

1. **AEE [Asociación Empresarial Eólica]**. [consulta 30-6-2015] Disponible en:
<http://www.aeeolica.org/>
2. **Ashby, Michael F.** Materials and the environment: eco-informed material choice. 2nd. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.
3. **Askeland, Donald R.** Ciencia e ingeniería de los materiales. Tercera edición.
4. **Balart Gimeno, R.** (2011, septiembre, 27). Fibras de refuerzo para materiales compuestos. [Archivo de vídeo] Recuperado de
<https://www.youtube.com/watch?v=0MINLJmjApk>
5. **Beauson J., Lilholt H., Brøndsted P.** Recycling solid residues recovered from glass fibre reinforced composites –A review applied to wind turbine blade materials. 2014.
6. **Blueprint-adl.com.** [consulta 26-8-2015] Disponible en: <http://www.blueprint-adl.com/es/vehicleowners/faq/remanufacturedparts/>
7. **Carbonconcrete.es.** [consulta 27-6-2015] Disponible en:
<http://www.carbonconcrete.es/HTLM/es/Material%20Compuesto.html>
8. **CES Edupack 2015.** Ecoaudit. 2015.
9. --- Universo materiales.
10. --- Universo procesos.
11. **Claire Fiona Wait.** The Reuse and Recycling of Glass Fibre.
12. **Conroy A., Halliwell S., Reynolds T.** Composite recycling in the construction industry. 2015.
13. **Eastman.com.** [consulta 1-9-2015]. Disponible en:
<http://www.eastmancuts.com/about-us/language-espanol.html>
14. **Efeverde.com.** [consulta 28-7-2015]. Disponible en:
<http://www.efeverde.com/noticias/un-metodo-innovador-permite-recuperar-para-su-posterior-reutilizacion-la-fibra-de-vidrio/>
15. **Eis.uva.es.** [consulta 6-9-2015] Disponible en:
http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0405/reciclado_auto/tiposdereciclado.htm

16. **El diario.es.** [consulta 25-6-2015] Disponible en:
http://www.eldiario.es/economia/aerogeneradores-obsolotas-cementorios-desastre-ecologico-Gamesa-Acciona_0_251275028.html
17. **Ewea.org.** [consulta 28-8-2015] Disponible en:
http://www.ewea.org/fileadmin/files/our-activities/policy-issues/environment/research_note_recycling_WT_blades.pdf
18. **Gamesacorp.com.** [consulta 16-7-2015] Disponible en:
<http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/diseño-y-fabricación/proceso-fabricación-montaje.html>
19. **Gestores de residuos.org.** [consulta 2-6-2014] Disponible en:
<http://gestoresderesiduos.org/noticia/problemas-de-gestión-con-las-palas-de-los-aerogeneradores-eolicos-en-desuso>
20. **Gomez Antón, M^aR y Gil Bercero, J.R.** Los plásticos y el tratamiento de sus residuos. Madrid, 1997.
21. **González García, J.** (2014, mayo, 6). Introducción a los materiales compuestos. [Archivo de vídeo] Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=fcbKi-OrDYM>
22. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.** NTP 642: Fibras minerales artificiales y otras fibras diferentes del amianto (II): evaluación y control.
23. **Interempresas.net.** [consulta 22-8-2015]. Disponible en:
<http://www.interempresas.net/Quimica/>
24. **João R. Correia, Nuno M. Almeida, João R. Figueira.** Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures.
25. **La información.com.** [consulta 30-7-2015] Disponible en:
<http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/11/28/palas-reciclaje/>
26. **Medioambient.gencat.cat.** [consulta 6-8-2015] Disponible en:
http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/educacio_i_sostenibilitat/educacio_per_a_la_sostenibilitat/suport_educatiu/recursos_educatius/residus/reciclatge_de_l_alumini.pdf
27. **Nowakowski, A.** Dimensionamiento, selección de materiales y cálculo estructural de un aerogenerador eólico doméstico. 2014.

28. **Opex energy.** [consulta 1-7-2015] Disponible en: http://opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html
29. **Pavón D.** Sistema de mecanizado láser de materiales compuestos (resina epoxy reforzada con fibra de carbono o vidrio) y metales (aluminio y titanio). 2007.
30. **Pickering, S.J.** Recycling technologies for thermoset composite materials.
31. **Prodexcr.com.** [consulta 21-7-2015] Disponible en:
<http://www.prodexcr.com/descargas/5%20Prodex%20vrs%20Fibra%20de%20Vidrio.pdf>
32. **Reciclame.info.** [consulta 8-7-2015] Disponible en:
<http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/vertederos-controlados/>
33. **Sanz, F.** Diseño estructural de palas.
34. **Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.** Gestión integral de residuos sólidos. Ed. McGraw-Hill, 1994.
35. **Trituracionmolienda.com.** [consulta 31-8-2015] Disponible en:
<http://www.trituracionmolienda.com/Molinos.html>
36. **Uach.cl.** [consulta 12-7-2015] Disponible en:
http://www.uach.cl/procarbono/huella_de_carbono.html
37. **Unirioja.es.** [consulta 10-6-2014] Disponible en:
<http://www.unirioja.es/divulgacion/aerogeneradoresl.shtml>
38. **Ugr.es.** [consulta 1-7-2015] Disponible en:
<http://www.ugr.es/~filosofia/recursos/innovacion/convo-2005/trabajo-escrito/como-elaborar-un-articulo-cientifico.htm>
39. **Wikipedia.** [consulta 25-6-2015] Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica

